

Relief Network Design Problem: A Distributionally Robust Optimization Approach

Aliakbar Hasani*

Abstract

In this study, a robust two-stage risk-aversion optimization model is proposed for the multi-product relief network design problem. The comprehensive set of decisions for locating and reinforcing relief facilities, inventory planning, and distributing healthcare items has been considered in an integrated manner. Uncertainties of relief facility capacity, relief demand, and the node linkage capacity are considered. Moreover, the weighted average expected loss is considered in the proposed robust planning model. The efficiency of the proposed model has been evaluated by examining numerical instances. The obtained results indicate the efficiency of the distributionally robust model compared to the traditional two-stage stochastic model. In addition, the type of ambiguous set and levels of confidence, risk aversion, and adjustment parameters will affect network performance.

Keywords: Disaster Management; Relief Network Design; Uncertainty; Robust Distributed Optimization; Risk Aversion.

Received: Mar. 09, 2021; Accepted: Agu. 13, 2021.

* Associate Professor, Shahrood University of Technology (Corresponding Author).

Email: aa.hasani@shahroodut.ac.ir

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال یازدهم، شماره ۴۴، زمستان ۱۴۰۰، صص ۸۵ - ۱۱۹ (نوع مقاله: پژوهشی)

DOI: [10.52547/JIMP.11.4.85](https://doi.org/10.52547/JIMP.11.4.85)

مسئله طراحی شبکه امداد: رویکرد بهینه‌سازی استوار توزیعی

علی اکبر حسنی*

چکیده

در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی استوار دومرحله‌ای ریسک‌گریز برای طراحی شبکه امداد چندمحصولی ارائه شده است. مجموعه تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات خدمت‌دهنده و مدیریت موجودی اقلام امدادی به صورت یکپارچه اتخاذ شده است. ظرفیت تسهیلات خدمت‌دهنده، تقاضای دریافت اقلام امدادی و ظرفیت مسیرهای ارتباطی تحت تأثیر بروز اختلال همراه با عدم قطعیت خواهد بود. میانگین وزنی زیان موردانتظار در توسعه مدل برنامه‌ریزی استوار لحاظ شده است. کارایی مدل پیشنهادی با بررسی مسائل عددی متعدد ارزیابی شده است. نتایج کلیدی مطالعه حاکی از کارایی مدل استوار توزیعی ریسک‌گریز نسبت به مدل تصادفی دومرحله‌ای مرسوم است؛ همچنین نوع مجموعه مبهم و سطوح پارامترهای سطح اطمینان، ریسک‌گریزی و تنظیم‌کننده بر عملکرد شبکه امداد تأثیرگذار خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: مدیریت بحران؛ طراحی شبکه امداد؛ عدم قطعیت؛ بهینه‌سازی استوار توزیعی؛ ریسک‌گریز.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۲.

* دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود (نویسنده مسئول).

Email: aa.hasani@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر شاهد افزایش وقوع بحران و در پی آن آسیب‌پذیری زنجیره‌های تأمین بوده‌ایم؛ از این رو توجه به مقوله مدیریت بحران باهدف کنترل آثار مستقیم و غیرمستقیم بر عملکرد زنجیره تأمین حائز اهمیت است [۱۶، ۱۷، ۱۸، ۲۰]. طراحی شبکه امداد رسانی شامل گستره متنوعی از تصمیمات همچون برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل خدمات به‌نحو کارا و اثربخش، نقش مؤثری بر کیفیت ارائه خدمات امدادی در پاسخ به بحران‌ها خواهد داشت [۱۴]. مجموعه اقدامات در شبکه امداد در دو دسته کلی اقدامات قبل و بعد از بروز بحران با هدف کاهش اثرات و ریسک‌های محتمل و بازگشت شبکه به حالت طبیعی تعریف می‌شود [۳۱]. در مبانی نظری موضوع، با توجه به دامنه تصمیمات، اقدام به بررسی و طراحی شبکه امداد قبل از بروز بحران، بعد از بروز بحران و توأمان شده است [۱۹]. اقدامات انجام‌شده قبل از بروز اختلال به‌طور عمده متمرکز بر تصمیمات راهبردی و عملیاتی در راستای کاهش ریسک‌های پدیدآمده از اختلال است که برای نمونه می‌توان به مواردی نظیر مقاوم‌سازی تسهیل، توسعه سیستم چندمنبعی و نگهداری موجودی اطمینان اشاره کرد [۱]. به‌واسطه اقدامات مطرح‌شده برای توسعه شبکه امداد پیش از وقوع بحران، پاسخگویی شبکه تحت اختلال‌های پدیدآمده پس از بحران ارتقا خواهد یافت [۱۱]. از سوی دیگر، با مشاهده وقوع بحران می‌توان مجموعه‌ای از اقدامات متناسب با ابعاد آن و آسیب‌پذیری ایجادشده اعمال خواهد شد. هدف عمده از این اقدامات مقابله‌ای در طی دوران بحران عبارت است از: کاهش اثرات تلفات و آسیب جانی مردم، کاهش آثار اقتصادی و هزینه‌های ایجادشده تحت بحران و موارد مشابه دیگر [۵]. این در حالی است که اتخاذ توأمان تصمیمات قبل و بعد از بحران می‌تواند در سطح بالاتری بر ارتقای کارایی و پاسخگویی شبکه امداد تأثیر بگذارد؛ از این رو طراحی مناسب شبکه امداد به‌عنوان یک تصمیم راهبردی اثرات بلندمدت معناداری بر عملکرد خدمت‌رسانی شبکه پس از اختلال دارد. به‌عبارت‌دیگر نیاز است تا در قالب یک مدل جامع به بررسی اثرات تصمیمات طراحی شبکه بر عملکرد استوار، کارا و پاسخگو شبکه امداد تحت اختلال و نامعینی‌های پدیدآمده در پی آن با توجه به دامنه گسترده تصمیمات قبل و بعد از بحران پرداخته شود. لحاظ‌کردن نامعینی‌های ممکن در پی وقوع بحران که پارامترهای کلیدی برنامه‌ریزی در شبکه امداد را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد دارای اهمیت و درعین‌حال دشواری بسیاری است.

تحت شرایط عدم قطعیت، تصمیمات طراحی شبکه امداد می‌تواند به‌صورت طبیعی در قالب دسته‌بندی برنامه‌ریزی تصادفی در دو مرحله تعریف شود. در تصمیمات مرحله نخست، مجموعه اقدامات مستقل از بحران، همچون راه‌اندازی تسهیل، مقاوم‌سازی تسهیل و تخصیص موجودی به تسهیل امدادی انجام می‌شود. در مرحله دوم، تصمیمات مرتبط با پاسخگویی به تقاضا توسط شبکه امداد توسعه‌یافته لحاظ می‌شود. از جمله رویکردهای معمول برای مواجهه با عدم قطعیت

عبارت است از: نمایش عدم قطعیت بر اساس مجموعه سناریوهای معین و محدود تحت رویکرد برنامه‌ریزی سناریومحور. با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات کافی و مورد نیاز برای برآزش تابع توزیع احتمال پارامترهای غیرقطعی در بسیاری از شرایط همچون عدم قطعیت ناشی از بحران‌ها، استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی سناریومحور برای نمایش عدم قطعیت مطلوب است. با توجه به مواجهه با اطلاعات ناتمام و جزئی پیرامون پارامترهای غیرقطعی برای برنامه‌ریزی تحت بحران، رویکرد برنامه‌ریزی استوار توزیعی دومرحله‌ای می‌تواند برای مواجهه با این سطح بالا از عدم قطعیت در طراحی شبکه امداد به کار گرفته شود. این در حالی است که برنامه‌ریزی معمول تصادفی دومرحله‌ای اقدام به حداقل‌سازی هزینه‌های قطعی در مرحله نخست، به علاوه هزینه‌های تصادفی موردانتظار مرحله دوم می‌کند [۳۲]؛ از این رو برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ممکن است به یک راه‌حل میانگین منجر شود که به اندازه کافی برای مواجهه با پارامترهای غیرقطعی تحت بحران خوب نباشد. با توجه به شدت بالای هزینه‌های تبعات وقوع بحران، رویکرد کلی برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان، «ریسک‌گریزی» است؛ در نتیجه نیاز است تا ریسک‌های مرتبط با عدم قطعیت در فرایند طراحی شبکه امداد تحت بحران لحاظ شوند. در این راستا برای اجتناب از حصول نتایج نامطلوب می‌توان از معیار کارآمد و متداول «ارزش در معرض ریسک شرطی»^۱ استفاده کرد [۳۳]. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که ترکیب کردن هزینه موردانتظار و شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی می‌تواند به نحو مؤثری ناکارآمدی رویکردهای خنثی نسبت به ریسک و ریسک عدم قطعیت را به صورت تومانی کاهش دهد [۲۹]. بدین منظور از شاخص ریسک وزنی با عنوان «متوسط ارزش در معرض ریسک شرطی» برای انعکاس ترجیحات ریسک تصمیم‌گیرنده در مسئله طراحی شبکه امداد به منظور مقابله با بحران استفاده شده است. در نهایت یک مدل برنامه‌ریزی استوار دومرحله‌ای بر پایه معیار میانگین ارزش در معرض ریسک شرطی برای طراحی شبکه امداد توسعه یافته است. در این راستا عدم قطعیت پارامترهای کلیدی تأمین، تقاضا و ظرفیت مسیرهای ارتباطی در لحاظ شده است. علاوه بر آن، در طراحی استراتژیک شبکه امداد، راهبردهای کاهش ریسک شامل مقاوم‌سازی تسهیلات و نگهداری موجودی اطمینان پیش از وقوع اختلال لحاظ شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با افزایش فراوانی و شدت وقوع بحران‌ها در سال‌های اخیر، تغییر در رویکرد مدیریت بحران به سوی وضعیت فعالانه با تدوین برنامه‌ها و اقدامات کارا در مواجهه با اختلال‌های پدیدآمده در پی بحران، مشهود بوده است [۴، ۱۴]. تمرکز بخش عمده‌ای از مطالعات مدیریت بحران بر

1. Conditional Value at Risk (CVaR)

مسئله طراحی شبکه امداد با هدف مکان‌یابی تسهیلات امدادی، یک تصمیم راهبردی و اثرگذار بر عملکرد شبکه و مدیریت جریان اقلام امدادی در راستای ارتقای کیفیت و کارایی امدادرسانی است [۱۱]. در این راستا، قابلیت اطمینان تسهیلات در مسئله مکان‌یابی تسهیلات امدادی مورد توجه بوده و مدل‌های متنوعی از جمله مدل p -میانه، p -مرکز، مدل حداکثر پوششی و مدل پوشش تور در این حوزه ارائه شده است [۲، ۶، ۲۶، ۱۲]. اسنایدر و داسکین^۱ (۲۰۰۵)، یک مدل مکان‌یابی تسهیلات با هزینه ثابت و بدون محدودیت مبتنی بر قابلیت اطمینان هر تسهیل ارائه کردند؛ درحالی‌که وقوع شکست در تسهیل به صورت غیروابسته بوده و از تسهیلات پشتیبان برای پاسخگویی به تقاضاهای دریافتی استفاده شده است [۳۵]. آگگن^۲ (۲۰۱۵)، مدل‌های بهینه‌سازی مدیریت بحران را بررسی کرد [۲]. اخیال^۳ (۲۰۰۴)، یک مدل بهینه‌سازی برای مکان‌یابی تسهیلات امدادی و مدیریت موجودی اقلام امدادی باهدف حداقل کردن مسافت طی شده برای ارائه خدمات به نقاط تقاضا ارائه کرده است [۳]. جای^۴ و همکاران (۲۰۰۷)، با هدف پاسخگویی به مسئله مدیریت بحران، اقدام به توسعه مدل بهینه‌سازی و روش حل کارا برای مواجهه با مسائل با ابعاد بزرگ کردند [۲۲]. جای^۵ و همکاران (۲۰۰۷)، باهدف حداکثرسازی پاسخ به تقاضای دریافت‌شده تحت بحران، یک مدل بهینه‌سازی پیکربندی شبکه امدادی تحت عدم قطعیت نمایش داده‌شده با رویکرد سناریومحور معرفی کردند [۲۳]. با توجه به ماهیت پیچیده بروز اختلال و وابستگی میان آن‌ها، لحاظ کردن روابط مابین اختلال‌ها، کارایی تصمیم‌سازی در شرایط مدیریت بحران را افزایش می‌دهد [۸]. رائل و ترنکیست^۶ (۲۰۱۰)، یک مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای سناریومحور برای طراحی و آماده‌سازی شبکه امداد تحت نامعینی ظرفیت تسهیل و تقاضا باهدف حداقل کردن هزینه‌های مدیریت شبکه ارائه کردند [۳۲].

طراحی شبکه امدادی. مدیریت حمل و نقل جریان امدادی تحت تأثیر مدیریت شبکه امداد قرار خواهد گرفت؛ از این رو مته و زبینسکی^۷ (۲۰۱۰)، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای تحت عدم قطعیت زمان انتقال در شبکه امداد (مابین تسهیل و نقطه تقاضا) باهدف حداقل کردن هزینه‌های مدیریت شبکه ارائه کردند [۲۸]. در مطالعه‌ای دیگر، حداقل کردن متوسط زمان وزنی انتقال اقلام امدادی در شبکه درمان تحت بروز اختلال و عدم قطعیت تقاضا بررسی شده است [۱۲]. دوین و همکاران^۸ (۲۰۱۲)، با بررسی طراحی شبکه امداد چندسطحی، یک مدل یکپارچه

-
1. Snyder & Daskin
 2. Akgun
 3. Akkihal
 4. Jia
 5. Jia
 6. Rawls & Turnquist
 7. Mete & Zabinsky
 8. Döyen

مکان‌یابی - مدیریت موجودی با رویکرد بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای ارائه کردند [۱۳]. بزرگی و همکاران (۲۰۱۲)، به صورت هم‌زمان دو تابع هدف حداقل‌سازی هزینه انتظاری مدیریت شبکه و کمبود در پاسخگویی به نقاط تقاضا را در طراحی شبکه امداد استوار مدنظر قرار دادند [۱۰]. گاریدو^۱ و همکاران (۲۰۱۴)، با توسعه مدل بهینه‌سازی تصادفی، تصمیمات یکپارچه مکان‌یابی تسهیلات امدادی، مدیریت موجودی و توزیع اقلام امدادی را در شبکه امداد لحاظ کردند.

امدادرسانی تحت بروز اختلال. با توجه به اهمیت مدیریت شبکه توزیع تحت بروز اختلال، احمدی و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل مکان‌یابی - مسیریابی یکپارچه تحت عدم قطعیت زمان انتقال و ارائه خدمت غیرقطعی با رویکرد بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای ارائه کردند. تسهیلات موقت نیز به نوبه خود می‌توانند چابکی شبکه امداد را تحت اختلال ارتقا دهد. ایکدا و اینویه^۲ (۲۰۱۶)، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل تحت بروز اختلال را با لحاظ کردن سه معیار مسافت طی‌شده برای تخلیه، زمان موردنیاز برای تخلیه و امنیت مسیرهای تخلیه بررسی کردند [۲۱]. برزین‌پور و اسماعیلی (۲۰۱۴)، با تمرکز بر آماده‌سازی شبکه امداد قبل از اختلال اقدام به حداقل‌کردن هزینه‌های مدیریت شبکه و حداکثر کردن پوشش تقاضا تحت بحران کردند [۷]. صبحی و همکاران (۲۰۱۶)، با توجه به مسئله مدیریت حمل‌ونقل تحت بحران به‌عنوان یک تصمیم هماهنگ با طراحی شبکه، یک شبکه امداد چندسطحی با هدف حداقل‌کردن زمان کل حمل‌ونقل و تعداد وسایل حمل، طراحی کردند [۳۴]. اونان^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، مکان‌یابی تسهیلات موقت در توسعه شبکه امداد را با هدف حداقل‌کردن هزینه‌های مدیریت شبکه و ریسک ایجاد ضایعات خطرناک موردبررسی قرار دادند [۳۰]. با توجه به نقش تصمیمات مدیریت موجودی در عملکرد شبکه امداد تحت بحران، توفیقی (۲۰۱۱)، یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی سناریومحور دومرحله‌ای برای اتخاذ تصمیمات یکپارچه مکان‌یابی و مدیریت موجودی ارائه کردند [۳۶]. با توجه به اهمیت بررسی مسئله طراحی شبکه امداد در ابعاد واقعی، کیلسی^۴ و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل بهینه‌سازی برای مکان‌یابی پناهگاه‌های اضطراری و موقت به‌منظور مواجهه با زلزله در قالب شبکه یکپارچه خدمت‌رسانی توسعه دادند [۲۴]. حسنی و مختاری (۲۰۱۸)، یک مدل استوار سناریومحور با افق برنامه‌ریزی غلطان برای طراحی شبکه امداد، باهدف حداقل‌نمودن هزینه‌های مدیریت شبکه به همراه یک رویکرد حل ابتکاری کارا تحت اختلال، ارائه کردند [۱۸]. حسنی و مختاری (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی استوار چندهدفه برای طراحی شبکه امداد

1. Garrido
2. Ikeda & Inoue
3. Onan
4. Kilci

با لحاظ کردن تصمیمات مدیریت موجودی مبتنی بر گروه‌بندی اقلام امدادی به همراه الگوریتم حل فراابتکاری برای حل مدل پیشنهادی در ابعاد بزرگ ارائه دادند [۱۹].

نتایج بررسی مبانی نظری موضوع مدیریت بحران حاکی از توجه به توسعه مدل‌های بهینه‌سازی برای ارتقای کارایی و اثربخشی تصمیمات در شرایط بحران است. این در حالی است که با توجه به پیچیدگی و چالش‌های متعدد تصمیم‌سازی در شرایط بحران به واسطه عدم قطعیت‌های عمیق ممکن، نیاز به توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری یادشده در شرایط عدم قطعیت با هدف ارائه تصمیمات استوار احساس می‌شود. در این راستا در پژوهش حاضر تلاش شده است تا در جنبه‌های زیر، توسعه نسبت به دیگر مطالعات انجام شده صورت گیرد:

- ارائه مدل بهینه‌سازی استوار توزیعی ریسک‌گریز برای طراحی شبکه امداد با تصمیمات توأم مکان‌یابی و مدیریت موجودی. در این راستا با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات کامل پیرامون رفتار تابع توزیع پارامترهای کلیدی، عدم قطعیت تقاضا، ظرفیت تسهیل و مسیر ارتباطی تحت بحران با بهره‌گیری از رویکرد پیشنهادی لحاظ می‌شود. مجموعه‌های مبهم جعبه‌ای و چندوجهی برای توابع احتمال ممکن تحت عدم قطعیت معرفی خواهد شد. در نهایت مدل قرین استوار قابل حل ارائه می‌شود. مدل بهینه‌سازی استوار توزیعی ریسک‌گریز پیشنهادی در قالب یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای عمومی معرفی خواهد شد؛ همچنین ارزش مدل استوار توزیعی پیشنهادی در مقایسه با مدل برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای مرسوم تحلیل می‌شود.

نتایج بررسی مطالعات مشابه و پژوهش حاضر در جدول ۱، ارائه شده است.

جدول ۱. جمع‌بندی مبانی نظری موضوع در حوزه طراحی شبکه زنجیره امداد رسانی

پژوهشگر (سال)	متغیرهای تصمیم‌گیری	هدف	پارامتر غیرقطعی	رویکرد مواجهه با عدم قطعیت	راهبرد کاهنده ریسک
احمدی و همکاران	مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسایل حمل‌ونقل	حداقل کردن هزینه‌های انتظاری	زمان انتقال و ارائه خدمت	بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای	تسهیل موقت
برزین‌پور و اسماعیلی	مکان‌یابی تسهیلات و مدیریت جریان	حداقل سازی هزینه و حداکثرسازی پوشش تقاضا	-	-	-
ایکدا و اینویه	برنامه‌ریزی مسیرهای تخلیه	حداقل سازی فاصله و زمان تخلیه و حداکثرسازی امنیت مسیر تخلیه	-	-	-

پژوهشگر (سال)	متغیرهای تصمیم‌گیری	هدف	پارامتر غیرقطعی	رویکرد مواجهه با عدم قطعیت	راهبرد کاهنده ریسک
حسینی و مختاری	مکان‌یابی تسهیلات و مدیریت جریان و موجودی	حداقل‌سازی هزینه	تقاضا و ظرفیت تسهیل	بهینه‌سازی استوار سناریومحور	-
حسینی و مختاری	مکان‌یابی تسهیلات و مدیریت جریان و دسته‌بندی موجودی	حداقل‌سازی هزینه و ریسک خدمت	تقاضا و ظرفیت تسهیل	بهینه‌سازی استوار سناریومحور	-
کیلی و همکاران	مکان‌یابی تسهیلات موقت	حداقل راه‌اندازی تسهیل موردنیاز	-	-	تسهیل موقت
اونان و همکاران	مکان‌یابی تسهیلات و مدیریت جریان	حداقل‌سازی هزینه شبکه در یک دوره زمانی	تقاضا	بهینه‌سازی استوار توزیعی	-
اونان و همکاران	مکان‌یابی تسهیلات و مدیریت جریان	حداقل‌سازی هزینه و ریسک تخلیه	-	-	-
صبحی و همکاران	مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسایل حمل‌ونقل	حداقل‌سازی زمان حمل و تعداد وسایل حمل‌ونقل	-	-	-
پژوهش حاضر	مکان‌یابی تسهیلات، مدیریت جریان و انتخاب راهبردهای کاهنده ریسک	حداقل‌سازی هزینه‌های مدیریت شبکه در چند دوره زمانی	تقاضا، ظرفیت تسهیلات و مسیرهای ارتباطی	بهینه‌سازی استوار توزیعی	مقاوم‌سازی تسهیلات

۳. روش‌شناسی پژوهش

بیان مسئله. در این پژوهش، طراحی شبکه امدادی تحت بحران با هدف ارائه یک پاسخ مناسب با اقدامات قبل و بعد از وقوع بحران به‌وسیله یک سلسله‌مراتب مناسب از تصمیم‌ها در دو مرحله بررسی شده است. در مرحله نخست، تسهیلات امدادی فعال با سطح عملکردی معین مشخص می‌شوند. راهبردهای کاهش اثر بروز اختلال به‌کار گرفته می‌شود و اقلام امدادی در تسهیلات پیش از وقوع بحران استقرار می‌یابند. پس از وقوع بحران و انتشار آثار آن و عدم قطعیت پدیدآمده بر ظرفیت تسهیل، تقاضای دریافت خدمات امدادی و ظرفیت مسیرهای ارتباطی، تصمیمات مرحله دوم اتخاذ می‌شوند. این تصمیمات بر مدیریت حمل‌ونقل اقلام امدادی در شبکه با هدف پاسخگویی به تقاضای نقاط آسیب‌دیده از وقوع بحران متمرکز است. پس از وقوع بحران، ظرفیت برخی از تسهیلات و مسیرهای ارتباطی تحت تأثیر شدت بحران دچار اختلال می‌شوند.

آسیب‌پذیری هر یک از ابعاد شبکه شامل تسهیلات و ارتباطات آن‌ها به‌واسطه سناریوها تعریف می‌شود. سناریوهای یادشده مبتنی بر تحلیل اطلاعات مربوط به سوابق بروز بحران‌ها و نظرهای خبرگان سازمان مدیریت بحران تعریف خواهد شد. مسئله شرح‌داده‌شده قابل‌تعریف در ساختار مدل‌سازی یک مسئله برنامه‌ریزی دومرحله‌ای است. در مرحله نخست بر تصمیمات یکپارچه مکان‌یابی - مدیریت موجودی تسهیلات و راهبردهای مقابله با اختلال تمرکز خواهد شد. در مرحله دوم نیز بر توزیع جریان مجموعه اقلام امدادی با هدف پاسخگویی به تقاضای ایجادشده پس از وقوع اختلال تمرکز می‌شود. با توجه به عدم‌دسترسی به اطلاعات تابع توزیع احتمال پارامترهای غیرقطعی در فضای واقعی مدیریت بحران، در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی استوار دومرحله‌ای ریسک‌گریز برای طراحی شبکه امدادسانی توسعه یافته است. هدف مدل توسعه‌یافته عبارت است از: حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های قطعی برای تصمیمات مرحله اول و تعادل بین بدترین هزینه کل موردانتظار و میانگین وزنی زیان موردانتظار (ارزش در معرض ریسک شرطی) برای هزینه‌های کل متغیر. میانگین در این حالت، میانگین وزنی زیان موردانتظار برای هزینه کل متغیر تعریف ناشی از ابعاد تعیین‌شده در مرحله دوم خواهد بود. عملکرد تسهیل امدادی تحت تأثیر وقوع اختلال قرار دارد. وضعیت مقاوم‌سازی هر تسهیل بر میزان شدت اثرپذیری تأثیرگذار است. ظرفیت خدمت‌دهی تسهیل به‌واسطه وقوع اختلال دچار تغییر می‌شود. مسیر ارتباطی مابین تسهیلات و نقاط تقاضا تحت بحران از دسترس خارج می‌شود و یا ظرفیت انتقال آن کاهش یابد. ظرفیت خدمت‌دهی تسهیل نگهداری اقلام امدادی محدود است.

مفروضات. مفروضات در نظر گرفته‌شده در توسعه مدل ریاضی مبتنی بر بیان مسئله به شرح زیر است:

- همبستگی مابین وقوع اختلال‌ها نادیده گرفته شده است. ظرفیت تسهیل و مسیر حمل و تقاضای نقاط تحت تأثیر وقوع اختلال قرار خواهند گرفت؛
- ظرفیت تسهیلات و مسیرهای ارتباطی و تقاضای دریافت خدمات امدادی تحت تأثیر وقوع اختلال با عدم قطعیت همراه خواهند بود؛
- اطلاعات کافی برای برآورد تابع توزیع احتمال پارامترهای غیرقطعی در دسترس نیست؛
- مقاوم‌سازی تسهیل به‌عنوان یک راهبرد کاهنده ریسک آثار وقوع اختلال به‌کار گرفته خواهد شد.

مدل ریاضی. نمادگذاری و مجموعه روابط مدل ریاضی توسعه‌داده‌شده برای مسئله طراحی شبکه امدادی دومرحله‌ای ریسک‌گریز در ادامه ارائه شده است. نماد N نمایانگر مجموعه گره‌ها شامل نقاط تقاضا و تسهیلات امدادی، J نشان‌دهنده مجموعه تسهیلات امدادی، P نمایانگر

مجموعه نقاط تقاضا (P زیرمجموعه N)، نشان‌دهنده مجموعه اقلام امدادی، T نمایانگر مجموعه نوع تسهیلات، L نشان‌دهنده مجموعه مسیرهای ارتباطی و S نمایانگر مجموعه سناریوها است.

پارامترها

V_R : فضای اشغال‌شده توسط کالای امدادی k برای نگهداری در تسهیل امدادی

FC_t : هزینه ثابت راه‌اندازی تسهیل امدادی در سطح خدمت‌دهی t

FC'_t : هزینه ثابت مقاوم‌سازی تسهیل امدادی در سطح خدمت‌دهی t

HC_r : هزینه نگهداری کالای امدادی r

SC_r : هزینه عدم‌پاسخگویی به تقاضای کالای امدادی r

BC_r : هزینه تأمین واحد کالای امدادی r

IC_t : ظرفیت نگهداری تسهیل امدادی در سطح t

$TCrl$: هزینه انتقال کالای امدادی r در مسیر ارتباطی l

D_{rps} : تقاضا برای کالای امدادی r در نقطه تقاضای p تحت سناریو s

π : فضای نمونه

σ : جبر سیگما بر روی مجموعه π

Pr : شاخص احتمال بر روی π

(π, σ, Pr) : فضای احتمال انتزاعی

P_s : احتمال وقوع سناریوی s

RC_{js} : درصد از کل ظرفیت از دست‌رفته تسهیل j تحت سناریوی s

$AC_{jj's}$: ظرفیت کل مسیر ارتباطی از j به j' تحت سناریوی s

BC_{jps} : ظرفیت کل مسیر ارتباطی از j به p تحت سناریوی s

AC'_{rjjs} : ظرفیت اشغال‌شده از مسیر ارتباطی j به j' برای انتقال کالای r تحت سناریوی s

BC'_{rjps} : ظرفیت اشغال‌شده از مسیر ارتباطی j به p برای انتقال کالای r تحت سناریوی s

$(RC_{rjs}, D_{rps}, AC_{jj's})$: اطلاعات غیرقطعی دریافت‌شده تحت سناریوی s .

متغیرها

z_{rj} : میزان اقلام امدادی r تخصیص‌یافته به تسهیل امدادی j

y_{rjjs} : میزان کالای امدادی r حمل‌شده از تسهیل j به j' تحت سناریوی s

y'_{rjps} : میزان کالای امدادی r حمل‌شده از تسهیل j به نقطه تقاضای p تحت سناریوی s

x_{ij} : متغیر باینری نشان‌دهنده راه‌اندازی تسهیل امدادی j در سطح t

x'_{ij} : متغیر باینری نشان‌دهنده مقاوم‌سازی تسهیل امدادی z در سطح t

i_{rjs} : میزان کالای امدادی r مازاد در تسهیل امدادی z در نقطه s

m_{rps} : میزان تقاضای پاسخ‌داده‌نشده به کالای امدادی r در نقطه تقاضای p تحت سناریوی s

در مدل پیشنهادی، در سطح اول پیرامون متغیرهای راه‌اندازی تسهیل با سطح خدمت معین، مقاوم‌سازی تسهیل و سطح نگهداری موجودی در تسهیل امدادی تصمیم‌گیری می‌شود. در سطح دوم نیز پیرامون مدیریت جریان اقلام امدادی تحت تأثیر وقوع بحران با هدف پاسخگویی به نقاط تقاضا تصمیم‌گیری می‌شود.

مدل ریاضی مرحله اول. تصمیمات اتخاذشده در سطح اول مدل برنامه‌ریزی پیش از وقوع اختلال اتخاذ خواهند شد. راه‌اندازی تسهیل جدید و مقاوم‌سازی تسهیلات موجود با توجه به سطح آن، هزینه ثابت برای مدیریت شبکه امداد به همراه خواهد داشت. از سوی دیگر، تأمین اقلام امدادی استقرار داده‌شده در هر یک از تسهیلات امدادی، با توجه به نوع کالا همراه با هزینه خواهد بود. تصمیمات یادشده مستقل از وقوع سناریوهای تعریف‌کننده اختلال خواهد بود. تابع هدف مسئله سطح اول عبارت است از: حداقل‌سازی هزینه‌های کل شبکه (رابطه ۱).

$$f(x, z, m) = \min \left(\begin{array}{l} \sum_{t,j} FC_t x_{ij} + \sum_{t,j} FC'_t x'_{ij} + \sum_{r,j} BC_r z_{ij} \\ + G(x, x', z, \lambda(m)) \end{array} \right) \quad (1)$$

محدودیت ۲، نشان می‌دهد که اقدام مقاوم‌سازی تنها برای تسهیلات فعال به کار گرفته خواهد شد؛ درحالی‌که مستقل از سناریوهای وقوع اختلال خواهد بود؛ اما تصمیمات اتخاذشده توسط آن‌ها بر تصمیمات مرحله دوم تأثیرگذار است. محدودیت‌های ۳ و ۴ نیز دامنه متغیرهای تصمیم‌گیری در مرحله یک را نشان می‌دهند.

$$x'_{ij} \leq x_{ij} \quad \forall t, j \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, x'_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall t, j \quad (3)$$

$$z_{ij} \geq 0 \quad \forall r, j \quad (4)$$

مدل ریاضی مرحله دوم. با توجه به ساختار شبکه امداد ایجادشده در سطح یک، برنامه‌ریزی توزیع اقلام امدادی به‌منظور پاسخگویی به تقاضای دریافت‌شده تحت تأثیر سناریوهای

برنامه‌ریزی مدنظر قرار خواهد گرفت. امکان مواجهه با جواب نشدنی در محدودیت‌های تصادفی برای تمامی سناریوها در نظر گرفته شده است و سپس جریمه معرفی یک جواب نشدنی با توجه به میزان تخطی آن نیز لحاظ خواهد شد؛ در نتیجه در تابع هدف سطح دوم، تلاش خواهد شد تا مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل، نگهداری اقلام در تسهیلات امدادی و عدم پاسخگویی به تقاضای نقاط تحت پوشش حداقل شود. در این راستا تابع هدف سطح دوم برای سناریوی اختلال s در رابطه ۶ تعریف شده است.

$$G(x, z, \xi^s) = \min \sum_{r,j,j'} TC_{ra} \cdot y_{rj's} + \sum_{r,j,p} TC_{ra} \cdot y'_{rjps} + \sum_{r,j} HC_r \cdot i_{rjs} + \sum_{r,p} SC_r \cdot m_{rps} \quad (5)$$

$$\sum_r V_r \cdot z_{rj} \leq RC_{js} \cdot IC_t \cdot x_{tj} \quad \forall j, s \quad (6)$$

$$\sum_{j(j \neq j')} y_{rj's} + z_{rj'} = \sum_{j(j \neq j')} y_{rj's} + i_{rj's} \quad \forall r, j', s \quad (7)$$

$$\sum_j y_{rjps} + m_{rps} = D_{rps} \quad \forall r, p, s \quad (8)$$

$$\sum_{r,j,j'} AC'_{rj'j} \cdot y_{rj's} \leq AC_{jj's} \quad \forall s \quad (9)$$

$$\sum_{r,j,p} BC'_{rjp} \cdot y_{rjps} \leq BC_{jps} \quad \forall s \quad (10)$$

$$y_{rj's}, y'_{rjps}, i_{rjs}, m_{rps} \geq 0 \quad (11)$$

محدودیت ۶ تضمین‌کننده استقرار اقلام امدادی در تسهیلات فعال با در نظر گرفتن ظرفیت انبارش است. وقوع اختلال می‌تواند ظرفیت خدمت‌دهی (نگهداری اقلام) تسهیلات امدادی را تحت تأثیر قرار دهد. محدودیت ۷، تعادل جریان ورودی به و خروجی از هر تسهیل امدادی به‌عنوان یک گره در شبکه تحت بررسی را نشان می‌دهد. جریان ورودی به هر تسهیل امدادی عبارت است از: مجموع جریان‌های واردشده از دیگر تسهیلات امدادی و موجودی تخصیص‌یافته به‌صورت مستقیم (از شبکه تأمین بالادستی) به آن تسهیل. این در حالی است که با توجه به میزان جریان خروجی از هر تسهیل امدادی، امکان نگهداری موجودی در پایان دوره برنامه‌ریزی نیز لحاظ شده است. محدودیت ۸، تضمین‌کننده پاسخگویی به تقاضاهای دریافت‌شده است که در آن امکان مواجهه با شرایط کسری نیز لحاظ شده است. محدودیت‌های ۹ و ۱۰، به‌ترتیب نشان‌دهنده محدودیت انتقال جریان در مسیرهای ارتباطی مابین تسهیلات امدادی و مابین تسهیلات امدادی و نقاط تقاضا هستند. وقوع اختلال می‌تواند ظرفیت این مسیرها را تحت تأثیر قرار دهد.

مدل ریاضی بهینه‌سازی استوار توزیعی دومرحله‌ای. در زمان رویارویی با سطح بالایی از عدم قطعیت و دسترسی ناکافی به داده‌های معتبر به‌منظور برآورد تابع احتمال و رفتار پارامترهای کلیدی تحت برنامه‌ریزی بر پایه رویکردهای معمول برنامه‌ریزی احتمالی و فازی، می‌توان از رویکرد برنامه‌ریزی استوار استفاده کرد [۹]. مالوی^۱ و همکاران (۱۹۹۵)، اقدام به معرفی رویکرد برنامه‌ریزی استوار سناریو محور نموده‌اند [۲۸]. این در حالی است که برتسیماس و سیم^۲ (۲۰۰۴) با توجه به احتمال محدود نوسان تمامی پارامترهای غیرقطعی نسبت به مقدار اسمی خود به‌صورت توأمان، مفهوم بودجه عدم قطعیت را در برنامه‌ریزی استوار در نظر گرفته‌اند.

برای معرفی مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ریسک‌گریز از رویکرد ارائه‌شده توسط نویان^۳ (۲۰۱۲)، بهره گرفته شده است [۲۷]. فرض می‌شود که اطلاعات تابع احتمال جزئی مربوط به پارامترهای همراه با عدم قطعیت در دسترس باشد. مدل دومرحله‌ای رابطه ۱۲، بر اساس معیار میانگین - ارزش در معرض ریسک شرطی^۴ ارائه شده است.

$$A^1 : \min \left(\begin{array}{l} \sum_{t,j} FC_t \cdot x_{tj} + \sum_{t,j} FC'_t \cdot x'_{tj} + \sum_{r,j} BC_r \cdot z_{rj} \\ + \sup_{p \in P} \left\{ \begin{array}{l} (1-\omega) E_p \left[(G(X, X', Z, \lambda)) \right] \\ + \omega CVaR_\alpha (G(X, X', Z, \lambda)) \end{array} \right\} \end{array} \right) \quad (12)$$

s.t.

محدودیت‌های (۲-۴) و (۶-۱۱)

در رابطه ۱۲، P نشان‌دهنده مجموعه ابهام توزیع دربردارنده توزیع صحیح p ، α نمایانگر سطح اطمینان منعکس‌کننده الزامات برای هزینه مرحله دوم و ω تعیین‌کننده وزن ازپیش‌تعیین‌شده ارزش در معرض ریسک برای هزینه مرحله دوم است. مطلوب خواهد بود که پارامتر ω بر اساس ترجیحات تصمیم‌گیرنده و جنبه عملیاتی تصمیمات تعیین شود. تابع هدف ۱۲، دربردارنده هزینه‌های تحت تأثیر اقدامات در مرحله نخست شامل راه‌اندازی تسهیلات، مقاومت‌سازی تسهیلات و تخصیص اقلام امدادی به تسهیلات و همچنین هزینه‌های مربوط به تصمیمات مرحله دوم دارای حداقل مقدار موردانتظار و ارزش در معرض ریسک برای بدترین توزیع فرم P خواهد بود. مدل A^1 یک مدل برنامه‌ریزی نامتناهی است که در دسته مسائل بهینه‌سازی سخت قرار می‌گیرد (به‌واسطه مجموعه‌های مبهم عمومی که نمی‌توانند به‌صورت مستقیم توسط

1. Mulvey
2. Bertsimas & Sim
3. Noyan
4. Mean-conditional value-at-risk (CVaR)

نرم‌افزارهای بهینه‌سازی معمول حل شوند). برای تبدیل مدل A^I پیشنهادی به یک مدل بهینه‌سازی قابل محاسبه در یک تابع زمانی چندجمله‌ای، نیاز است تا مجموعه‌های مبهم چندوجهی و جعبه‌ای متعلق به توزیع‌های ممکن برای عدم قطعیت‌های برنامه‌ریزی به صورت زیر معرفی شود:

مجموعه‌های مبهم. مجموعه‌های مبهم چندوجهی و جعبه‌ای مبتنی بر توابع توزیع جزئی در دسترس ایجاد شده‌اند که p متعلق به آن توسط روابط ۱۳ و ۱۴، تعریف شده است.

$$p \in P_B = \{p \mid p = p_0 + \theta, e^T \theta = 0, \tau^- \leq \theta \leq \tau^+\} \quad (13)$$

$$p \in P_\beta = \{p \mid p = p_0 + C\theta, e^T C\theta = 0, p_0 + C\theta \geq 0, \|\theta\|_1 \leq 1\} \quad (14)$$

p_0 نمایانگر تابع توزیع اسمی برای احتمالات گسسته است. در روابط ۱۳ و ۱۴، e نیز بردار با درایه‌های یک است. بردار اغتشاش برابر است با $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_{|S|})$ و B ماتریس مقیاس‌گذاری. شرط‌های ضمنی $e^T \theta = 0$ و $e^T B\theta = 0$ به منظور حصول اطمینان از آن است که بردار p شرایط پایه برای تابع توزیع مدنظر را ارضا کند؛ همچنین از آنجاکه تابع احتمال دارای مقدار مثبت است، $p_0 + \theta \geq 0$. دلیل اصلی برای لحاظ کردن مجموعه ابهام چندوجهی و جعبه‌ای عبارت است از آنکه آن‌ها ساده‌ترین مجموعه‌های ابهام هستند که تعریف خواهند شد و در نتیجه به فرموله‌بندی قابل محاسبه خواهند منجر شد.

بازنویسی مدل A^I . در ادامه، مدل A^I به فرم قابل محاسبه با در نظر گرفتن مجموعه‌های مبهم چندوجهی و جعبه‌ای تبدیل خواهد شد. $\{E_p[(G(X, X', Z, \lambda))]\}$ و $\{\text{CVaR}_\alpha(G(X, X', Z, \lambda))\}$ در مدل A^I به ساختار مجموعه مبهم متعلق به توابع احتمال گسسته وابسته است. مقدار موردانتظار هزینه‌های مرحله دوم برابر با رابطه ۱۵، است.

$$\sup_{p \in P} E_p[G(X, X', Z, \lambda)] = \sup_{p \in P} G(X, X', Z, \lambda)^T p \quad (15)$$

بر اساس تعریف شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی، فرم معادل ارزش در معرض ریسک شرطی متعلق به هزینه مرحله دوم $\{\text{CVaR}_\alpha(G(X, X', Z, \lambda))\}$ توسط رابطه (۱۶) نشان داده می‌شود.

$$\min_{\phi \in R^T} \quad \phi + \frac{1}{1-\alpha} \max_{p \in P} q^T p \quad (16)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} q_s \geq G(X, X', Z, \lambda)_s - \phi, \forall s \in S \\ q_s \geq 0, \forall s \in S \end{cases}$$

در رابطه بالا $G(X, X', Z, \lambda)^T = (G(X, X', Z, \lambda)_1, \dots, G(X, X', Z, \lambda)_{|S|})$ و $q = (q_1, q_2, \dots, q_{|S|})^T$ با توجه به نتایج پژوهش ما^۱ و همکاران (۲۰۲۰) برای مجموعه‌های عدم قطعیت چندوجهی و جعبه‌ای طراحی شده، می‌توان مدل پیشنهادی را به مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط معادل تبدیل کرد [۲۲].

قضیه ۱: اگر احتمال p متعلق به مجموعه میهم جعبه‌ای باشد، مدل A^I می‌تواند به صورت معادله زیر، نوشته شود که یک مدل بهینه‌سازی قابل حل در زمان تابع چندجمله‌ای است: در مدل ۱۷، $(\kappa, \kappa', \delta, \delta', \gamma, \gamma') \in R \times R \times R^{[S]} \times R^{[S]} \times R^{[S]} \times R^{[S]}$ همان بردار/متغیرهای دوگان است.

اثبات. با فرض اینکه بردار تابع احتمال p متعلق به مجموعه ابهام جعبه‌ای باشد، مسائل ۱۵ و ۱۶، هر دو یک مسئله برنامه‌ریزی خطی خواهند بود. بر اساس تعریف مقدار موردانتظار و مجموعه ابهام جعبه‌ای، $\sup_{p \in P} E_p [G(X, X', Z, \lambda)]$ می‌تواند به صورت روابط ۱۸، فرموله شود.

بر اساس قضیه دوگان قوی برای برنامه‌ریزی خطی، مدل دوگان مسئله ۱۸، به صورت مدل برنامه‌ریزی خطی ۱۹ و فرم ارزش در معرض ریسک شرطی معادل برای تابع هزینه مرحله دوم به صورت مدل ۲۰، قابل‌بازنمایش است. توجه نمایید مسئله ۲۰، یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای θ است، به صورت مدل ۲۱، فرموله خواهد شد. مسئله دوگان برای مدل ۲۰، نیز به صورت مدل برنامه‌ریزی خطی ۲۲، قابل‌نمایش است. با ترکیب مدل‌های ۱۹ و ۲۲، تحت مجموعه میهم P_B ، مدل محاسباتی قابل حل برای مسئله A^I به صورت مدل ۲۳، ارائه خواهد شد.

$$\min_{x, x', z, \phi, \kappa, \delta, \gamma, \kappa', \delta', \gamma'} \left(\begin{array}{l} \sum_{i,j} FC_i x_{ij} + \sum_{i,j} FC'_i x'_{ij} + \sum_{r,j} BC_r z_{rj} \\ + (1-\omega) \left(G(X, X', z, \lambda)^T p_0 + [\tau^-]^T \delta + [\tau^+]^T \gamma \right) \\ + \omega \left[\phi + \frac{1}{1-\alpha} \left(m^T p_0 + [\tau^-]^T \delta' + [\tau^+]^T \gamma' \right) \right] \end{array} \right) \quad (17)$$

$$s.t. \quad \begin{cases} c_s \geq G(X, X', z, \lambda) - \phi, \forall s \in S \\ e\kappa + \delta + \gamma = G(X, X', z, \lambda) \\ e\kappa' + \delta' + \gamma' = m \\ m_s \geq 0, \forall s \in S \\ \delta \leq 0, \gamma \geq 0, \delta' \leq 0, \gamma' \geq 0 \\ (2-4) \text{ and } (6-11) \end{cases}$$

$$\sup_{p \in P_b} E_p [G(X, X', Z, \lambda)] = \sup_{p \in P_b} G(X, X', Z, \lambda)^T (p_0 + \theta) \quad (18)$$

$$= G(X, X', Z, \lambda)^T p_0 + \max_{\theta} [G(X, X', Z, \lambda)^T \theta \mid e^T \theta = 0, \tau^- \leq \theta \leq \tau^+]$$

$$\min_{\kappa, \delta, \gamma} G(X, X', z, \lambda)^T p_0 + [\tau^-]^T \delta + [\tau^+]^T \gamma \quad (19)$$

$$s.t. \quad \begin{cases} e\kappa + \delta + \gamma = G(X, X', z, \lambda) \\ \delta \leq 0, \gamma \geq 0 \end{cases}$$

$$\min_{\phi \in R^+} \phi + \frac{1}{1-\alpha} \left(m^T p_0 + [\tau^-]^T \delta' + [\tau^+]^T \gamma' \right) \quad (20)$$

$$s.t. \quad \begin{cases} m_s \geq G(X, X', z, \lambda)_s - \phi, \forall s \in S \\ m_s \geq 0, \forall s \in S \end{cases}$$

$$\max_{\theta} \theta^T m \quad (21)$$

$$s.t. \quad \begin{cases} e^T \theta = 0 \\ \theta \geq \tau^-, \theta \leq \tau^+ \end{cases}$$

$$\min_{\phi \in R^+} \phi + \frac{1}{1-\alpha} \left(m^T p_0 + [\tau^-]^T \delta' + [\tau^+]^T \gamma' \right) \quad (22)$$

$$s.t. \quad \begin{cases} c_s \geq G(X, X', z, \lambda)_s - \phi, \forall s \in S \\ e\kappa' + \delta' + \gamma' = m \\ c_s \geq 0, \forall s \in S, \delta' \leq 0, \gamma' \geq 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \min_{x, x', z, \phi, \kappa, \delta, \gamma, \kappa', \delta', \gamma'} & \left(\begin{aligned}
 & \sum_{i,j} FC_i x_{ij} + \sum_{i,j} FC'_i x'_{ij} + \sum_{r,j} BC_r z_{rj} \\
 & + (1-\omega) \left(G(X, X', z, \lambda)^T p_0 + [\tau^-]^T \delta + [\tau^+]^T \gamma \right) \\
 & + \omega \left[\phi + \frac{1}{1-\alpha} \left(m^T p_0 + [\tau^-]^T \delta' + [\tau^+]^T \gamma' \right) \right]
 \end{aligned} \right) \\
 s.t. & \begin{cases}
 c_s \geq G(X, X', z, \lambda) - \phi, \forall s \in S \\
 e\kappa + \delta + \gamma = G(X, X', z, \lambda) \\
 e\kappa' + \delta' + \gamma' = m \\
 c_s \geq 0, \forall s \in S \\
 \delta \leq 0, \gamma \geq 0, \delta' \leq 0, \gamma' \geq 0 \\
 (2-4) \text{ and } (6-11)
 \end{cases} \quad (23)
 \end{aligned}$$

قضیه ۲: اگر احتمال p متعلق به یک مجموعه چندوجهی باشد، مدل A^1 می‌تواند به صورت مدل بهینه‌سازی قابل‌حاصل معادله ۲۴، تبدیل شود. در مدل ۲۴، $(\kappa, \kappa', \delta, \delta', \gamma, \gamma') \in R \times R \times R^{[S]} \times R^{[S]} \times R^{[S]} \times R^{[S]}$ همان بردار / متغیرهای دوگان است.

اثبات. با فرض اینکه بردار تابع توزیع احتمال p به یک مجموعه مبهم چندوجهی متعلق باشد، $\sup_{p \in P} E_p [G(X, X', Z, \lambda)]$ به صورت رابطه ۲۵، قابل‌نمایش است. در رابطه ۲۵، $\|\theta\|_1 = \sum_{s \in S} |\theta_s|$ و $\psi^*(G)$ برابر با مقدار بهینه مدل برنامه‌ریزی محدب رابطه ۲۶ است. تابع لاگرانژ مسئله ۲۶، در رابطه ۲۷، نشان داده شده است؛ سپس می‌توان تابع دوگان لاگرانژ را با استفاده از متغیرهای $(\eta, \varepsilon, \sigma) \in R^{[S]} \times R \times R$ به صورت رابطه ۲۸، معرفی کرد که در آن رابطه ۲۹، عبارت از تابع مزدوج برای رابطه ۳۰، است.

$$\min_{x, x', z, \eta, \varepsilon, \sigma, \eta', \varepsilon', \sigma'} \left(\begin{array}{l} \sum_{t,j} FC_t x_{ij} + \sum_{t,j} FC'_t x'_{ij} + \sum_{r,j} BC_r z_{rj} \\ + (1-\omega) \left(G(X, X', z, \lambda)^T p_0 + p_0^T \eta + \phi \right) \\ + \omega \left[\phi + \frac{1}{1-\alpha} (p_0^T m + p_0^T \eta' + \varepsilon') \right] \end{array} \right) \quad (24)$$

$$s.t. \quad \left\{ \begin{array}{l} m_s \geq G(X, X', z, \lambda)_s - \phi, \forall s \in S \\ \|L^T G(X, X', z, \lambda) + L^T \eta + L^T c \sigma\|_{\infty} \leq \varepsilon \\ \|L^T m + L^T \eta' + L^T c \sigma'\|_{\infty} \leq \varepsilon' \\ c_s \geq 0, \forall s \in S \\ \eta \geq 0, \varepsilon \geq 0, \eta' \geq 0, \varepsilon' \geq 0, (2-4) \text{ and } (6-11) \end{array} \right.$$

$$\sup_{p \in P_B} E_p [G(X, X', Z, \lambda)] = \sup_{p \in P_B} G(X, X', Z, \lambda)^T (p_0 + \theta) \\ = G(X, X', Z, \lambda)^T p_0 + G(X, X', Z, \lambda)^T p_0 + \psi^*(G) \\ + \max_{\theta} [G(X, X', Z, \lambda)^T L \theta | e^T L \theta = 0, p_0 + L \theta \geq 0, \|\theta\|_1 \leq 1] \quad (25)$$

$$\max_{\theta} \{G(X, X', Z, \lambda)^T L \theta | e^T L \theta = 0, p_0 + L \theta \geq 0, \|\theta\|_1 \leq 1\} \quad (26)$$

$$L(\eta, \varepsilon, \sigma, \beta) = G(X, X', Z, \lambda)^T C \theta + \eta^T (p_0 + C \theta) + \sigma (e^T C \theta) \\ + \varepsilon (1 - \|\theta\|_1) \quad (27)$$

$$q(\eta, \varepsilon, \sigma) = \max_{\theta} L(\eta, \varepsilon, \sigma, \theta) \\ = (p_0^T \eta + \varepsilon) + \max_{\theta} \{(C^T G(X, X', Z, \lambda) + C^T \eta + C^T e \sigma) \theta - \varepsilon \|\theta\|_1\} \\ = (p_0^T \eta + \varepsilon) + f^*(C^T G(X, X', Z, \lambda) + C^T \eta + C^T e \sigma) \quad (28)$$

$$f^* \left(\begin{array}{l} C^T G(X, X', Z, \lambda) \\ + C^T \eta + C^T e \sigma \end{array} \right) = \begin{cases} 0 & \|C^T G(X, X', Z, \lambda) + C^T \eta + C^T e \sigma\|_{\infty} \leq \varepsilon \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

$$f(\theta) = \varepsilon \|\theta\|_1 \text{ and}$$

$$\left\| \begin{pmatrix} C^T G(X, X', Z, \lambda) \\ + C^T \eta + C^T e \sigma \end{pmatrix} \right\|_{\infty} = \max_{s \in S} \left\| \begin{pmatrix} C^T G(X, X', Z, \lambda) \\ + C^T \eta + C^T e \sigma \end{pmatrix}_s \right\| \quad (30)$$

برای هر $\eta \geq 0$ و $\varepsilon \geq 0$ ، مدل دوگان برای مسئله ۲۶، برابر با مدل ۳۱ است.

$$\begin{aligned} \min_{(\eta, \varepsilon, \sigma) \in R^{|S|} \times R \times R} \quad & p_0^T \eta + \varepsilon \\ \text{s.t.} \quad & \left\{ \begin{aligned} & \|C^T G(X, X', Z, \lambda) + C^T \eta + C^T e \sigma\|_\infty \leq \varepsilon \\ & \eta \geq 0, \varepsilon \geq 0 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (31)$$

بنابراین مدل برنامه‌ریزی معادل برای مسئله ۲۶، با توجه به متغیرهای $\eta, \varepsilon, \sigma \in R^{|S|} \times R \times R$ می‌تواند به صورت مدل ۳۲، نشان داده شود. به طور مشابه، فرم معادل ارزش در معرض ریسک شرطی برای تابع هزینه مرحله دوم می‌تواند به صورت مدل ۳۳، نمایش داده شود. با ترکیب روابط ۳۲ و ۳۳، تحت مجموعه مبهم p_c ، مدل A^T معادل با مدل قابل حل ۲۴، خواهد بود. قضیه ۳، نشان می‌دهد که مدل برنامه‌ریزی استوار توزیعی دومرحله‌ای به طور کلی تعمیم‌یافته مدل برنامه‌ریزی احتمالی است.

قضیه ۳: در شرایطی که $\tau^+ = 0$ ، مدل استوار توزیع شده ۱۷ و ۲۴، به مدل مرسوم برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای تبدیل خواهد شد. قضیه ۳ به شرایط حدی مدل برنامه‌ریزی استوار توزیعی دومرحله‌ای اشاره دارد. هنگامی که میزان انحراف در مدل یادشده برابر با صفر منظور شود، مدل برنامه‌ریزی استوار توزیعی دومرحله‌ای به مدل برنامه‌ریزی احتمال دومرحله‌ای معمول تبدیل خواهد شد.

$$\begin{aligned} \min_{(\eta, \varepsilon, \sigma) \in R^{|S|} \times R \times R} \quad & G(X, X', Z, \lambda)^T p^0 + p_0^T \eta + \varepsilon \\ \text{s.t.} \quad & \left\{ \begin{aligned} & \|C^T G(X, X', Z, \lambda) + C^T \eta + C^T e \sigma\|_\infty \leq \varepsilon \\ & \eta \geq 0, \varepsilon \geq 0 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \min_{(\eta, \varepsilon, \sigma) \in R^{|S|} \times R \times R} \quad & \phi + \frac{1}{1-\alpha} (p_0^T) \\ \text{s.t.} \quad & \left\{ \begin{aligned} & \|C^T G(X, X', Z, \lambda) + C^T \eta + C^T e \sigma\|_\infty \leq \varepsilon \\ & \eta \geq 0, \varepsilon \geq 0 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
 \min_{x, x', z, \eta, \varepsilon, \sigma, \eta', \varepsilon', \sigma'} & \left(\begin{aligned}
 & \sum_{i,j} FC_i x_{ij} + \sum_{i,j} FC'_i x'_{ij} + \sum_{r,j} BC_r z_{rj} \\
 & + (1-\omega) \left(G(X, X', z, \lambda)^T p_0 + p_0^T \eta + \phi \right) \\
 & + \omega \left[\phi + \frac{1}{1-\alpha} (p_0^T m + p_0^T \eta' + \varepsilon') \right]
 \end{aligned} \right) \\
 \text{s.t.} & \begin{cases}
 m_s \geq G(X, X', z, \lambda)_s - \phi, \forall s \in S \\
 \|L^T G(X, X', z, \lambda) + L^T \eta + L^T c \sigma\|_{\infty} \leq \varepsilon \\
 \|L^T m + L^T \eta' + L^T c \sigma'\|_{\infty} \leq \varepsilon' \\
 c_s \geq 0, \forall s \in S, \eta \geq 0, \varepsilon \geq 0, \eta' \geq 0, \varepsilon' \geq 0 \\
 (2-4) \text{ and } (6-11)
 \end{cases} \quad (34)
 \end{aligned}$$

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

ارزیابی کارایی مدل استوار توزیعی پیشنهادی تحت مجموعه‌های مبهم جعبه‌ای و چندوجهی با بررسی مسئله نمونه مبتنی بر مورد مطالعه انجام شده است (مقادیر پارامترهای α ، ω ، τ و τ^+ به ترتیب برابر است با ۰/۵، ۰/۵، ۱۰ و ۰/۰۱). بررسی‌های عددی مبتنی بر نمونه موردی مطالعه شده توسط حسنی و مختاری (۲۰۱۸، ۲۰۱۹)، انجام شده است [۱۸، ۱۹]. عمده نواحی شهر تهران در مناطق با خطر وقوع زلزله با شدت ۸ ریشتر قرار گرفته‌اند. برآوردها حاکی از خرابی گسترده سازه‌ها، قریب به ۵۵ درصد، پس از وقوع زلزله با شدت بالا است. ظرفیت نگهداری تسهیلات در سه سطح ۱، ۲ و ۳ به ترتیب عبارت است از: (4.3e+5, 6.2e+6)، (3.01e+5, 4.34e+6) و (2.15e+5, 3.1e+6) واحد فضا. برنامه‌ریزی در شبکه امداد برای پاسخگویی به تقاضای سه دسته کالای امدادی ضروری ۱، ۲ و ۳ با مقادیر تقاضای (7.16e+5, 1.03e+6)، (5.01e+5, 7.21e+6) و (3.58e+5, 5.15e+6) انجام شده است. هزینه ثابت راه‌اندازی و مقاوم‌سازی تسهیلات امدادی در محدوده (2e+11, 3e+11) و (8e+10, 12e+10) تعریف شده است. هزینه نگهداری واحد کالا، عدم پاسخگویی به تقاضا و هزینه تأمین واحد کالای امدادی به ترتیب عبارت است از: (2.2e+5, 3.2e+5)، (4.5e+5, 6.5e+5) و (3e+5, 3e+7). ظرفیت مسیرهای ارتباطی مابین گره‌های شبکه و ظرفیت اشغال شده برای انتقال واحد کالا در هر مسیر به ترتیب عبارت است از: (8e+3, 9.5e+4) و (1, 2.5). شبکه امداد در نظر گرفته شده به مجموعه ۳۷۴ نقطه تقاضا در سطح مناطق ۲۲ گانه تهران خدمت می‌دهد. تعداد ۱۰۰ تسهیل موجود و ۲۵ نقطه برای راه‌اندازی تسهیلات جدید در نظر گرفته شده است.

مجموعه سناریوهای برنامه‌ریزی در جدول ۲، مشاهده می‌شود. حل مدل‌های پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز انجام شده است.

جدول ۲. سناریوهای برنامه‌ریزی تحت وقوع بحران

سنا ریزی	P_s	D_{rps} (*e+6)	RC_{js} (*e+4)	$BC_{jps} = AC_{jj}'s$ (*e+3)	$BC'_{rjps} = AC'_{rjjs}$ (*e+2)
۱	۰/۱۲	(۰/۳۵، ۰/۹)	(۰/۰۷، ۰/۰۹)	(۰/۱۷، ۰/۴۰)	(۰/۰۴، ۰/۰۸)
۲	۰/۱۲	(۰/۴، ۱/۰۳)	(۰/۱۲، ۰/۳۱)	(۰/۲۰، ۰/۵۱)	(۰/۰۶، ۰/۱۷)
۳	۰/۱۲	(۰/۳۵، ۱/۰)	(۰/۰۸، ۰/۳۵)	(۰/۱۸، ۰/۱۶)	(۰/۰۷، ۰/۱۲)
۴	۰/۱۲	(۰/۴۵، ۱/۵)	(۰/۱۵، ۰/۴۵)	(۰/۲۵، ۰/۷۵)	(۰/۰۸، ۰/۳۵)
۵	۰/۱۲	(۰/۴۵، ۲/۰)	(۰/۳، ۰/۶۰)	(۰/۲۵، ۱)	(۰/۰۹، ۰/۴)
۶	۰/۱	(۰/۳۵، ۳/۰)	(۰/۱۶، ۱/۳۵)	(۰/۱۸، ۱/۵)	(۰/۱، ۰/۵)
۷	۰/۱	(۰/۳۵، ۴/۰)	(۰/۲، ۲/۰)	(۰/۲، ۲)	(۰/۰۹، ۱)
۸	۰/۱	(۰/۳۵، ۴/۵)	(۰/۲، ۲/۰)	(۰/۲۵، ۲)	(۰/۱۲، ۱/۲)
۹	۰/۰۵	(۰/۳۵، ۵/۱۵)	(۰/۲، ۲/۰)	(۰/۳، ۲)	(۰/۱۵، ۱/۵)
۱۰	۰/۰۵	(۰/۴۵، ۵/۱۵)	(۰/۳، ۲/۵)	(۰/۳، ۲/۵)	(۰/۲، ۱/۵)

نتایج حل مدل شامل تسهیل امداد راه‌اندازی شده و نوع آن، وضعیت مقاوم‌سازی تسهیل موجود و موجودی تخصیص‌یافته برای هر قلم کالا در هر تسهیل، به‌ترتیب برای تسهیلات جدید و موجود در جدول‌های ۳ و ۴، نشان داده شده است. تعداد تسهیلات گشایش‌یافته و یا مقاوم‌شده و همچنین میزان موجودی تخصیص‌یافته به تسهیلات تحت مجموعه جعبه‌ای کمتر و کوچک‌تر از مجموعه چندوجهی است. در شرایط $\alpha = 0.5$ و $\omega = 0.5$ ، مقادیر کل موجودی تخصیص‌یافته به مراکز امدادی جدید برای تمامی اقلام تحت برنامه‌ریزی برای مدل‌های برنامه‌ریزی استوار توزیعی با مجموعه ابهام جعبه‌ای (مدل ۱۷) و چندوجهی (مدل ۲۴) به‌ترتیب برابر با ۴۴۲۰۴ و ۷۳۰۱۱ است. به‌منظور تحلیل اثرگذاری سطح اطمینان بر عملکرد شبکه امداد تحت بحران، نتایج حل مدل برای $\alpha = 0.7$ نیز در جدول ۳، ارائه شده است. وضعیت تسهیلات گشایش‌یافته و نوع آن تغییر چندان محسوسی نسبت به حالت $\alpha = 0.5$ ندارد؛ اما میزان موجودی تخصیص‌یافته به تسهیلات و میزان مقاوم‌سازی تسهیلات افزایش بیشتری یافته است. دلیل این رفتار را می‌توان در رشد ارزش در معرض ریسک شرطی در پی افزایش در سطح اطمینان جستجو کرد؛ به‌عبارت‌دیگر، مقادیر بالاتر از سطوح اطمینان به رفتار محافظه‌کارانه‌تری منجر خواهد شد که افزایش سطح موجودی چرخه در شبکه امداد را در پی خواهد داشت. این در حالی است که تحت مجموعه ابهام جعبه‌ای، مقادیر موجودی تخصیص‌یافته برای تمامی اقلام افزایش خواهد یافت؛ درحالی‌که برای مجموعه چندوجهی این افزایش برای میزان اقلام

محدودتری مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، حساسیت جواب‌های ارائه‌شده برای طراحی شبکه امداد نسبت به هزینه عدم پاسخگویی به تقاضای دریافت اقلام امدادی، تحلیل شده است (جدول ۵). برای این منظور، مقادیر هزینه‌های مواجهه با کسری برای اقلام تحت برنامه‌ریزی در نقاط تقاضا تغییر داده شده است. با افزایش هزینه‌های مواجهه با کسری، ساختار شبکه سطح بالاتری از محافظه‌کاری اختیار می‌کند و در پی آن، سطح مقاوم‌سازی تسهیلات و سطح موجودی تخصیص داده‌شده، به‌ویژه برای اقلام با درجه اهمیت بالاتر، افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش هزینه مواجهه با کسری برای یک مجموعه از اقلام به افزایش جزئی در سطح موجودی دیگر اقلام منجر شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی استوار توزیعی، نتایج حل مدل برای مقادیر متفاوت سه پارامتر کلیدی w ، α و τ^+ ارائه شده است. برای α مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ و لحاظ شده است. برای w مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ در نظر گرفته شده است. برای τ^+ نیز مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ تعیین شده است. نتایج حل مدل با توجه به مقادیر پارامترهای تعیین شده برای دو مجموعه مبهم جعبه‌ای و چندوجهی در جدول ۴، مشاهده می‌شود. در پی افزایش در سطح شاخص ریسک‌گریزی و سطح اطمینان، هزینه‌های مدیریت شبکه امداد نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش مقدار پارامتر تنظیم، مقدار بهینه مدل استوار توزیعی نیز افزایش خواهد یافت. شدت تغییرات در مقادیر بهینه مدل پیشنهادی برای سطوح اطمینان بیشتر از میانه تقریباً یکسان خواهد بود. این در حالی است که با افزایش پارامتر تنظیم، رشد معنادار در مقادیر بهینه مشهود خواهد بود. نتایج تحلیل‌های عددی برای مجموعه‌های مبهم جعبه‌ای (BR) و چندوجهی (PR) در شکل ۱، نشان داده شده است. تغییرات مقادیر بهینه حل مدل استوار توزیعی در برابر افزایش شاخص ریسک‌گریزی و تنظیم، رفتار خطی را نشان می‌دهد. با توجه به نمایش ارجحیت ریسک توسط شاخص سطح اطمینان، مقادیر بالاتر شاخص مدنظر نشان‌دهنده دریافت بالاتری از ریسک خواهد بود؛ در نتیجه با افزایش سطح اطمینان، مقدار ارزش در معرض ریسک شرطی نیز افزایش خواهد یافت. با افزایش مقدار شاخص ریسک‌گریزی، ریسک‌های در نظر گرفته شده دارای اهمیت نسبی بالاتری خواهند بود؛ در نتیجه مقادیر بالاتر شاخص سطح اطمینان و ریسک‌گریزی، سطح بالاتری از ریسک را نشان می‌دهد و در نهایت می‌تواند به اتخاذ سیاست‌های ریسک‌گریزانه شدیدتری ختم شود. نتایج کسب‌شده حاصل از حل مدل کاملاً منطقی بوده و به تأیید خبرگان نیز رسیده است. دلیل این رفتار را می‌توان در این مسئله جست‌وجو کرد که یک سطح مشخص از α نشان‌دهنده ترجیح ریسک است؛ در نتیجه مقادیر بزرگ‌تر آن به دریافت سطح بالاتری از ریسک منجر خواهد شد. علاوه بر آن، با افزایش α ، مقدار ارزش در معرض ریسک شرطی نیز افزایش خواهد یافت. با افزایش شاخص ریسک‌گریزی، ریسک‌های محتمل از اهمیت نسبی بالاتری برخوردار خواهند بود؛ در نتیجه افزایش شاخص‌های سطح اطمینان و ریسک‌گریزی سطح بالاتری از ریسک را تأکید خواهند

کرد و در نهایت به اتخاذ سطح بالاتری از سیاست‌های ریسک‌گریزی منجر خواهد شد. تابع هدف مدل برنامه‌ریزی نسبت به شاخص‌های ω و τ^+ دارای رابطه خطی و معنادار است. نتایج جدول ۵، نشان می‌دهد که هزینه‌های مدیریت شبکه امداد تحت مجموعه مبهم چندوجهی بیشتر از مجموعه جعبه‌ای است؛ به عبارت دیگر مجموعه مبهم جعبه‌ای به‌طور کامل توسط مجموعه مبهم چندوجهی پوشش داده می‌شود؛ در نتیجه مجموعه چندوجهی بزرگ‌تر و محافظه‌کارتر خواهد بود.

جدول ۳. نتایج حل مدل برای مقادیر مختلف سطح اطمینان (α) و ریسک‌گریزی (ω)-تسهیل جدید

$\omega = 0.7$ و $\alpha = 0.5$					$\omega = 0.5$ و $\alpha = 0.5$						
موجودی			نوع تسهیل	شماره تسهیل	مجموعه مبهم	موجودی			نوع تسهیل	شماره تسهیل	مجموعه مبهم
قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱				قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱			
۴۳۹	۳۶۳۱	۲۲۵۵	۲	۱	۳۸۲	۳۲۴۲	۱۹۷۸	۱	۱	جعبه‌ای	
۴۸۳	۱۳۴۲	۱۸۶۷	۲	۳	۴۲۷	۱۱۷۷	۱۶۵۲	۱	۳		
۵۰۶	۲۷۵۵	۱۶۵۰	۲	۵	۴۴۸	۲۴۱۷	۱۴۴۷	۲	۵		
۷۲۸	۳۸۵۹	۲۴۴۴	۳	۷	۶۳۳	۳۵۰۸	۲۱۲۵	۱	۷		
۳۸۸	۳۳۱۹	۱۱۹۲	۳	۱۰	۳۴۰	۲۸۴۹	۱۰۵۵	۲	۱۰		
۳۵۷	۱۷۰۴	۶۱۲	۲	۱۳	۳۱۳	۱۵۰۸	۵۳۲	۲	۱۳		
۲۲۵	۳۸۴۷	۶۰۹	۱	۱۴	۲۰۳	۳۴۰۴	۵۳۹	۲	۱۴		
۵۲۴	۱۹۳۴	۲۳۵۵	۳	۱۶	۴۶۴	۱۷۵۸	۲۱۲۲	۳	۱۶		
۱۵۷	۱۱۴۴	۴۳۵	۳	۱۸	۱۴۱	۱۰۴۰	۳۸۸	۱	۱۸		
۶۳۴	۱۵۴۷	۱۶۷۶	۲	۱۹	۵۵۱	۱۳۹۴	۱۴۷۰	۳	۱۹		
۵۰۳	۲۲۶۹	۲۴۷۵	۳	۲۳	۴۴۱	۲۰۲۶	۲۲۳۰	۱	۲۵		
۴۵۰	۳۵۶۲	۲۳۷۰	۱	۲۵	۲۶۸	۲۵۴۶	۳۱۹۰	۳	۲		چندوجهی
۲۹۰	۴۴۰۰	۲۸۵۷	۲	۱	۲۶۴	۳۸۶۰	۲۵۰۶	۱	۳		
۷۳۰	۲۹۶۴	۲۹۵۹	۲	۳	۶۳۵	۲۶۲۳	۲۶۶۶	۱	۴		
۶۷۲	۳۴۳۲	۶۷۳	۲	۴	۶۰۰	۳۰۲۷	۵۹۰	۱	۱۱		
۳۵۲	۲۴۹۰	۴۴۸	۲	۱۱	۳۱۷	۲۱۶۵	۴۰۷	۲	۱۴		
۳۳۶	۱۷۸۵	۲۷۹۵	۳	۱۴	۳۰۵	۱۵۸۰	۲۴۳۰	۱	۱۵		
۸۵۶	۲۸۷۵	۸۶۷	۲	۱۵	۷۷۱	۲۵۰۰	۷۷۴	۳	۱۷		
۳۰۳	۳۵۷۹	۳۲۷۰	۳	۱۷	۲۶۸	۳۱۶۷	۲۹۴۶	۱	۱۸		
۸۶۵	۲۰۸۱	۱۱۷۳	۲	۱۸	۷۸۶	۱۸۲۵	۱۰۴۷	۲	۱۹		
۴۸۰	۵۲۹	۱۵۴۶	۳	۱۹	۴۳۶	۴۶۸	۱۳۶۸	۲	۲۰		
۲۸۶	۲۶۶۵	۲۹۴۹	۳	۲۰	۲۴۹	۲۴۰۱	۲۶۸۱	۲	۲۱		
۳۱۱	۲۱۳۱	۳۶۰۵	۲	۲۱	۲۷۰	۱۸۵۳	۳۱۹۰	۱	۲۲		

$\omega = 0.7$ و $\alpha = 0.5$						$\omega = 0.5$ و $\alpha = 0.5$					
موجودی			نوع تسهیل	شماره تسهیل	مجموعه مهم	موجودی			نوع تسهیل	شماره تسهیل	مجموعه مهم
قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱				قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱			
۶۸۷	۴۲۷۷	۲۸۵۷	۲	۲۲	۵۹۷	۳۸۵۳	۲۵۰۶	۱	۲۳		
۷۸۵	۲۱۶۴	۳۰۶۱	۲	۲۳	۷۰۷	۱۹۳۲	۲۶۶۲	۱	۲۴		
۵۳۸	۳۰۵۳	۶۴۷	۳	۲۵	۴۸۰	۲۷۰۲	۵۸۳	۲	۲۵		

جدول ۴. نتایج حل مدل برای مقادیر مختلف سطح اطمینان (α) و ریسک‌گریزی (ω)-تسهیل موجود

$\omega = 0.7$ و $\alpha = 0.5$						$\omega = 0.5$ و $\alpha = 0.5$						
موجودی			نوع تسهیل	شماره تسهیل	مجموعه مهم	موجودی			مقاوم‌سازی	نوع تسهیل	شماره تسهیل	مجموعه مهم
قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱				قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱				
۴۵۷	۳۷۴۰	۲۳۲۳	۲	۱	۱	۴۰۵	۳۳۳۹	۲۰۵۷	۲	۱	۱۴	
۵۱۲	۱۴۰۹	۱۹۷۹	۲	۱	۱۹	۴۵۳	۱۲۱۲	۱۷۵۱	۲	۱	۱۵	
۵۲۱	۲۸۶۵	۱۷۱۶	۲	۱	۲۶	۴۶۶	۲۴۹۰	۱۵۳۴	۲	۱	۱۸	
۷۷۲	۴۰۹۱	۲۵۴۲	۲	۱	۳۱	۶۶۵	۳۶۸۳	۲۲۵۳	۳	۲	۲۱	
۴۰۴	۳۳۴۸	۱۲۵۲	۲	۱	۴۶	۲۵۴	۲۹۳۴	۱۱۰۸	۲	۱	۲۸	
۳۶۸	۱۷۸۹	۶۳۰	۲	۱	۴۹	۳۳۲	۱۵۸۳	۵۵۳	۳	۲	۵۸	
۲۳۴	۴۰۳۹	۶۲۷	۳	۲	۵۴	۲۰۹	۳۵۷۴	۵۶۶	۳	۲	۶۳	
۵۴۰	۲۰۵۰	۲۴۴۹	۳	۲	۶۲	۴۸۷	۱۸۶۳	۲۲۴۹	۳	۲	۶۸	
۱۶۵	۱۱۹۰	۴۵۲	۲	۱	۶۹	۱۴۷	۱۱۰۲	۴۰۷	۲	۱	۸۰	
۶۵۳	۱۶۲۴	۱۷۲۶	۳	۲	۷۴	۵۸۴	۱۴۵۰	۱۵۱۴	۲	۱	۸۲	
۵۲۳	۲۳۳۷	۲۶۲۴	۲	۱	۸۰	۴۶۳	۲۰۸۷	۲۳۴۲	۲	۱	۸۸	
۴۷۳	۳۶۶۹	۲۴۶۵	۲	۱	۶	۲۸۱	۲۶۷۳	۳۳۸۱	۳	۲	۴	
۳۰۵	۴۵۳۲	۲۹۷۱	۳	۲	۸	۲۷۵	۴۰۵۳	۲۵۸۱	۳	۲	۱۱	
۷۵۹	۳۱۱۲	۳۰۴۸	۳	۲	۱۱	۶۶۷	۲۷۸۰	۲۷۷۳	۳	۲	۱۷	
۷۰۶	۳۶۰۴	۷۰۷	۳	۲	۱۷	۶۳۶	۳۱۲۸	۶۱۴	۳	۲	۲۳	
۳۷۳	۲۵۶۵	۴۶۶	۳	۲	۲۷	۳۳۳	۲۲۵۲	۴۱۹	۲	۱	۲۴	
۳۴۹	۱۸۷۴	۲۹۶	۲	۱	۳۰	۳۱۴	۱۶۷۵	۲۵۷۶	۲	۱	۲۸	
۱۹۰	۲۹۶۱	۹۱۹	۲	۱	۳۲	۸۱۷	۲۶۲۵	۸۱۳	۳	۲	۳۱	
۳۱۲	۳۷۹۴	۳۴۶	۳	۲	۳۳	۲۷۹	۳۲۶۲	۳۰۳۴	۲	۱	۳۳	

جمع‌بندی

جمع‌بندی

چندوجهی

چندوجهی

$\omega = 0.7$ و $\alpha = 0.5$						$\omega = 0.5$ و $\alpha = 0.5$					
موجودی			نوع تسهیلات	شماره تسهیلات	مجموعه میهمان	موجودی			نوع تسهیلات	شماره تسهیلات	مجموعه میهمان
قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱				قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱			
۹۱۷	۲۱۶۴	۱۲۲	۲	۱	۳۷	۸۱۷	۱۸۹۸	۱۰۹۹	۳	۲	۵۱
۵۰۴	۵۶۱	۱۵۹	۳	۲	۴۰	۴۶۲	۴۹۶	۱۴۵۰	۳	۲	۶۴
۳۰۰	۲۷۹۸	۳۰۹۶	۳	۲	۴۲	۲۵۹	۲۵۲۱	۲۷۶۱	۲	۱	۶۹
۳۲۳	۲۱۹۵	۳۷۱۳	۲	۱	۵۰	۲۷۸	۱۹۰۹	۳۳۱۸	۲	۱	۷۷
۷۰۸	۴۴۰۵	۲۹۷۱	۲	۱	۶۰	۶۲۷	۴۰۰۷	۲۶۳۱	۲	۱	۸۱
۸۰۹	۲۲۲۹	۳۲۱۴	۲	۱	۷۸	۷۴۹	۲۰۴۸	۲۷۴۲	۲	۱	۸۴
۵۵۴	۳۲۰۶	۶۶۶	۲	۱	۹۲	۵۰۴	۲۸۱۰	۶۰۰	۲	۱	۸۶

در ادامه برای ارزیابی عملکرد مدل استوار توزیعی پیشنهادی به بررسی نتایج عملکردی آن در مقایسه با مدل تصادفی دومرحله‌ای پرداخته شده است. نتایج حل مدل برای مجموعه پارامترهای $\alpha = 0.8$ ، $\omega = 0.5$ ، $t = 10$ و $\tau^+ = 0.01$ در جدول ۶ ارائه شده است. تصمیمات راهبردی مربوط به مکان‌یابی تسهیلات امدادی جدید و سطح مقاوم‌سازی تسهیلات و همچنین تصمیمات تاکتیکی همچون سطح موجودی ذخیره‌شده در تسهیلات امدادی تحت دو مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و استوار توزیعی با یکدیگر به نحو معنادار متفاوت خواهند بود. علاوه بر بررسی مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری، اندازه توابع هدف محاسبه شده برای هر یک از مدل‌های تحت ارزیابی (مدل استوار توزیعی و تصادفی دومرحله‌ای با تابع احتمال معین) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف ارزیابی شده تحت مدل تصادفی دومرحله‌ای کمتر از مدل استوار توزیعی است. دلیل این مسئله را می‌توان در دسترسی مدل احتمالی به تابع توزیع احتمال دقیق جست‌وجو کرد. این در حالی است که در شرایط تصمیم‌سازی در دنیای واقعی، به دلیل دسترسی ناکافی به اطلاعات، امکان دسترسی به تابع توزیع احتمال پارامترهای نامعین فراهم نخواهد بود؛ همچنین تغییرات در هزینه انتظار و ارزش در معرض ریسک شرطی برای مقادیر مختلف پارامترهای کلیدی سطح اطمینان و ریسک‌گریزی ارزیابی خواهد شد (جدول ۷). نتایج حاکی از آن است که هزینه موردانتظار و ارزش در معرض ریسک شرطی برای مدل تصادفی کمتر از مدل استوار توزیعی خواهد بود. در شرایطی که شاخص ریسک‌گریزی حداقل مقدار را به خود اختصاص دهد ($\omega = 0$)، تابع هزینه کل تنها دربرگیرنده هزینه انتظاری مدیریت شبکه امداد خواهد بود؛ درحالی که هزینه مورد انتظار به واسطه عدم وابستگی به شاخص سطح

اطمینان برای مقادیر مختلف آن پارامتر دچار تغییر نخواهد شد. درمقابل در شرایط مواجهه با بالاترین سطح از شاخص ریسک‌گریزی، تابع هدف مدل برنامه‌ریزی تنها دربرگیرنده عبارت ارزش در معرض ریسک شرطی خواهد بود که این بخش از تابع هدف دارای وابستگی مستقیم به شاخص سطح اطمینان است.

برای ارزیابی عملکرد مدل استوار توزیعی پیشنهادی و برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای، ارزش استوارسازی با تفاضل مقادیر جواب بهینه حاصل از حل مدل‌ها تعیین خواهد شد. با توجه به در نظر گرفتن دو مجموعه جعبه‌ای و چندوجهی در تحلیل مدل استوار، ارزش استوارسازی تحت دو مجموعه یادشده محاسبه می‌شود. نتایج ارزیابی ارزش استوارسازی برای سطح اطمینان ۸۰ درصد، ریسک‌گریزی ۵۰ درصد و سطوح مختلف شاخص تنظیم‌کننده ارائه شده است (شکل ۱). نتایج نشان می‌دهد که ارزش استوارسازی با افزایش شاخص تنظیم‌کننده رشد می‌کند؛ همچنین ارزش استوارسازی برای مدل استوار توزیعی تحت مجموعه چندوجهی بیشتر از مدل جعبه‌ای است. به عبارت دیگر با مواجهه با مجموعه ابهام بزرگ‌تر، هزینه‌های تصمیم‌سازی افزایش خواهد یافت. این در حالی است که اجرای مدل استوار توزیعی در شرایط مواجهه با عدم قطعیت پیرامون تابع توزیع احتمال از نظر ارزش استوارسازی یک انتخاب مطلوب خواهد بود. نتایج حل مدل پیشنهادی از نظر بررسی زمان حل حاکی از آن است که با افزایش سطح عدم قطعیت، زمان حل مدل نیز افزایش خواهد یافت (جدول ۸). اگرچه زمان کلی حل مدل استوار نسبت به مدل احتمالی افزایش می‌یابد، اما ارتقای کیفیت جواب در مدل استوار با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات کافی پیرامون برآورد تابع توزیع پارامتر تصادفی برای تصمیم‌گیرندگان مطلوب خواهد بود. افزایش سطح عدم قطعیت (انتقال از مجموعه جعبه‌ای به چندوجهی) نیز به افزایش زمان حل مدل استوار منجر خواهد شد.

جدول ۵. نتایج حل مدل برای مقادیر مختلف پارامترهای α و τ^+ (برحسب $e+15$)

τ^+					α	مجموعه مقادیر	τ^+					α	مجموعه مقادیر
$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{4}{10}$	ω			$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{4}{10}$	ω		
۲۵۹	۲۲۸	۲۲۷	۲۰۳	ω^1	α^1	مجموعه مقادیر	۱۴۲	۱۳۵	۱۳۱	۱۲۰	ω^1	α^1	مجموعه مقادیر
۲۷۵	۲۹۴	۳۰۶	۳۲۴	ω^2			۱۴۸	۱۵۴	۱۶۴	۱۷۳	ω^2		
۲۸۸	۳۰۰	۳۱۵	۳۳۴	ω^3			۱۵۲	۱۶۰	۱۶۹	۱۷۶	ω^3		
۳۰۸	۳۲۴	۳۴۰	۳۶۴	ω^4			۱۵۷	۱۶۶	۱۷۶	۱۸۸	ω^4		
۳۱۸	۳۳۴	۳۵۷	۳۷۱	ω^5			۱۶۶	۱۷۶	۱۸۵	۱۹۶	ω^5		
۲۵۹	۲۲۸	۲۲۷	۲۰۳	ω^1	α^2	مجموعه مقادیر	۱۴۲	۱۳۵	۱۳۱	۱۲۰	ω^1	α^2	مجموعه مقادیر
۲۸۷	۳۰۸	۳۲۰	۳۴۲	ω^2			۱۵۹	۱۶۹	۱۷۵	۱۸۸	ω^2		
۳۱۰	۳۲۳	۳۳۹	۳۵۶	ω^3			۱۷۲	۱۸۲	۱۸۹	۲۰۱	ω^3		
۳۳۸	۳۵۲	۳۶۶	۳۹۲	ω^4			۱۹۱	۲۰۰	۲۱۰	۲۲۳	ω^4		
۳۷۹	۴۰۲	۴۲۶	۴۵۶	ω^5			۲۱۰	۲۲۰	۲۲۹	۲۳۸	ω^5		
۲۵۹	۲۲۸	۲۲۷	۲۰۳	ω^1	α^3	مجموعه مقادیر	۱۴۲	۱۳۵	۱۳۱	۱۲۰	ω^1	α^3	مجموعه مقادیر
۲۹۰	۳۰۵	۳۱۷	۳۳۶	ω^2			۱۶۰	۱۷۰	۱۸۰	۱۹۱	ω^2		
۳۲۸	۳۴۷	۳۶۸	۳۸۷	ω^3			۱۸۱	۱۹۲	۲۰۶	۲۱۴	ω^3		
۳۸۰	۳۹۹	۴۲۳	۴۴۴	ω^4			۲۰۹	۲۲۱	۲۳۰	۲۴۴	ω^4		
۴۳۷	۴۵۹	۴۸۷	۵۰۶	ω^5			۲۳۴	۲۴۵	۲۶۲	۲۷۸	ω^5		
۲۵۹	۲۲۸	۲۲۷	۲۰۳	ω^1	α^4	مجموعه مقادیر	۱۴۲	۱۳۵	۱۳۱	۱۲۰	ω^1	α^4	مجموعه مقادیر
۳۰۶	۳۲۱	۳۳۴	۳۵۰	ω^2			۱۷۰	۱۷۷	۱۸۶	۱۹۷	ω^2		
۳۶۷	۳۸۹	۴۱۶	۴۳۷	ω^3			۱۹۸	۲۱۲	۲۲۴	۲۳۳	ω^3		
۴۳۳	۴۵۰	۴۷۷	۵۰۱	ω^4			۲۲۹	۲۴۳	۲۵۳	۲۶۵	ω^4		
۵۱۵	۵۴۶	۵۷۳	۶۰۲	ω^5			۲۷۳	۲۸۹	۳۰۷	۳۲۸	ω^5		
۲۵۹	۲۲۸	۲۲۷	۲۰۳	ω^1	α^5	مجموعه مقادیر	۱۴۲	۱۳۵	۱۳۱	۱۲۰	ω^1	α^5	مجموعه مقادیر
۳۲۴	۳۴۶	۳۶۰	۳۷۵	ω^2			۱۷۳	۱۸۲	۱۹۵	۲۰۲	ω^2		
۳۹۵	۴۱۵	۴۴۰	۴۷۰	ω^3			۲۱۳	۲۲۸	۲۳۷	۲۵۱	ω^3		
۴۷۴	۴۹۳	۵۱۳	۵۳۸	ω^4			۲۵۸	۲۷۶	۲۸۷	۳۰۴	ω^4		
۵۸۸	۶۲۳	۶۶۷	۷۱۳	ω^5			۳۰۹	۳۲۲	۳۴۱	۳۵۵	ω^5		

جدول ۶. نتایج حل مدل تصادفی دومرحله‌ای (تسهیلات جدید) برحسب $e+15$

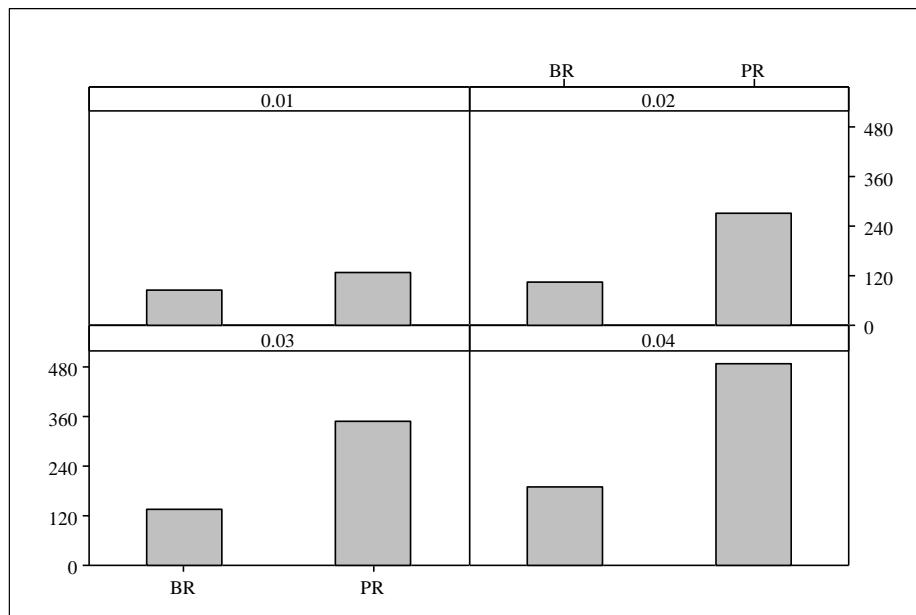
$\omega = 0.5$ و $\alpha = 0.8$						$\omega = 0.5$ و $\alpha = 0.8$					
موجودی			مقاوم‌سازی	فرق تسهیل	مجموعه میهم	موجودی			فرق تسهیل	شماره تسهیل	مجموعه میهم
قلم ۳	قلم ۲	قلم ۱				قلم ۲	قلم ۲	قلم ۱			
۴۱۴	۳۵۳۹	۲۲۳۶	۲	۱	۳۹۸	۳۳۷۰	۲۱۵۰	۱	۱		
۴۰۸	۱۲۵۱	۱۷۷۵	۳	۳	۳۹۶	۱۲۰۳	۱۷۲۳	۲	۳		
۵۰۲	۲۶۴۲	۱۵۸۶	۳	۴	۴۸۷	۲۵۴۰	۱۵۱۰	۲	۴		
۷۵۰	۳۹۷۰	۲۴۹۳	۲	۷	۷۱۴	۳۸۱۷	۲۴۲۰	۲	۹		
۳۹۶	۳۲۹۴	۱۲۰۹	۳	۹	۳۸۱	۳۱۶۷	۱۱۷۴	۱	۱۳	تجهیزات	
۳۶۳	۱۷۳۹	۶۲۹	۲	۱۱	۳۵۲	۱۶۷۲	۶۰۵	۲	۱۴		
۲۳۵	۳۹۳۶	۶۲۳	۳	۱۴	۲۲۴	۳۷۸۵	۵۹۹	۱	۱۸		
۵۳۷	۱۹۹۶	۲۴۰۶	۲	۱۵	۵۱۶	۱۹۰۱	۲۳۳۶	۱	۲۰		
۱۶۳	۱۱۸۵	۴۳۹	۳	۱۷	۱۵۵	۱۱۲۹	۴۲۶	۲	۲۳		
۶۶۲	۱۵۶۵	۱۷۱۶	۳	۱۸	۶۲۰	۱۵۱۹	۱۶۶۶	۲	۲۴		
۵۱۳	۲۳۴۷	۲۵۷۸	۳	۱۹	۴۹۸	۲۲۳۵	۲۴۵۵	۲	۲۵		
۵۴۰	۱۸۶۷	۲۴۱۲	۲	۲۰	مدل تصادفی دومرحله‌ای						
۶۶۸	۱۶۲۷	۱۷۸۵	۲	۲۱	۴۱۰	۳۵۰۵	۲۲۳۶	۱	۲		
۵۳۳	۲۴۱۷	۲۶۳۰	۳	۲۳	۴۰۸	۱۲۲۷	۱۷۵۷	۲	۳		
۴۱۴	۳۵۳۹	۲۲۳۶	۳	۲۵	۵۰۶	۲۶۱۶	۱۵۷۰	۱	۵		
					۷۲۸	۳۸۹۳	۲۵۱۷	۲	۹		
					۳۹۶	۳۲۶۲	۱۱۹۷	۲	۱۴		
					۳۶۶	۱۷۳۹	۶۱۷	۲	۱۸		
					۲۲۸	۳۸۶۱	۶۱۷	۲	۲۰		
					۵۲۶	۱۹۳۹	۲۳۸۳	۱	۲۳		
					۱۶۱	۱۱۷۴	۴۳۹	۱	۲۵		

جدول ۷. تحلیل مقادیر ارزش انتظاری و ارزش در معرض ریسک شرطی

CVaR	هزینه انتظاری (برحسب e+15)	مدل بهینه‌سازی	α	ω
-	۶۳۵/۳۹۶	احتمالی		
-	۶۸۳/۶۱۹	جعبه‌ای	۰/۶	
-	۷۲۰/۳۵۷	چندوجهی		۰
-	۶۳۵/۶۸۱	احتمالی		
-	۶۸۳/۷۳۴	جعبه‌ای	۰/۸	
-	۷۲۰/۵۲	چندوجهی		
۶۴۸/۶۹۵	۵۱۷/۶۷۴	احتمالی		
۶۹۷/۹۸۳	۵۳۴/۰۳۳	جعبه‌ای	۰/۶	
۷۴۳/۹۲۶	۵۲۲/۸۵۱	چندوجهی		۰/۲۵
۱۰۸۰/۰۷۶	۵۱۷/۲۹۹	احتمالی		
۱۱۹/۷۹۸	۵۳۴/۹۳۸	جعبه‌ای	۰/۸	
۱۲۸/۴۳۵	۵۵۲/۶۱۳	چندوجهی		
۱۵۶/۶۶۳	۳۹۶/۹۰۷	احتمالی		
۱۷۳/۵۱۴	۴۱۲/۶۴۷	جعبه‌ای	۰/۶	
۱۸۶/۸۱۵	۴۵۴/۶۹۳	چندوجهی		۰/۵
۲۱۲/۹۲۲	۳۹۶/۳۱۳	احتمالی		
۲۳۴/۵۳۷	۴۱۲/۳۲۷	جعبه‌ای	۰/۸	
۲۶۷/۳۷۱	۴۵۴/۲۲۶	چندوجهی		
۲۷۳/۲۷۷	۳۱۲/۸۷۵	احتمالی		
۲۸۵/۸۸۰	۳۷۶/۷۶۲	جعبه‌ای	۰/۶	
۲۹۸/۹۷۹	۳۹۹/۵۹۲	چندوجهی		۰/۷۵
۳۱۲/۴۵۰	۳۱۲/۰۲۷	احتمالی		
۳۴۵/۴۴۶	۳۷۶/۳۳۸	جعبه‌ای	۰/۸	
۳۷۰/۰۲۶	۳۹۹/۲۵۴	چندوجهی		
۳۸۱/۵۸۷	-	احتمالی		
۳۹۳/۵۵۷	-	جعبه‌ای	۰/۶	
۳۹۹/۸۸۵	-	چندوجهی		۱
۴۱۲/۸۱۸	-	احتمالی		
۴۲۳/۰۸۰	-	جعبه‌ای	۰/۸	
۴۳۰/۷۹۹	-	چندوجهی		

جدول ۸. ارزیابی زمان حل مدل پیشنهادی

زمان حل (ثانیه)	مدل بهینه‌سازی	α	ω
۴۹۲۴/۲۳	احتمالی		
۵۹۱۶/۶۵	جعبه‌ای	۰/۶	
۶۴۶۸/۹۰	چندوجهی		۰
۴۹۰۸/۰۶	احتمالی		
۶۳۵۴/۲۱	جعبه‌ای	۰/۸	
۶۷۲۲/۵۲	چندوجهی		
۴۷۸۰/۴۱	احتمالی		
۵۸۶۰/۰۲	جعبه‌ای	۰/۶	
۵۸۹۰/۷۱	چندوجهی		۰/۲۵
۴۷۵۷/۸۱	احتمالی		
۵۸۹۹/۰۵	جعبه‌ای	۰/۸	
۵۹۱۰/۱۷	چندوجهی		
۴۸۴۲/۰۱	احتمالی		
۵۵۵۹/۰۰	جعبه‌ای	۰/۶	
۵۷۰۹/۲۹	چندوجهی		۰/۵
۴۷۵۹/۷۷	احتمالی		
۵۵۰۲/۸۳	جعبه‌ای	۰/۸	
۵۵۴۷/۴۹	چندوجهی		
۴۷۵۶/۲۹	احتمالی		
۵۴۴۵/۷۱	جعبه‌ای	۰/۶	
۵۵۰۱/۱۱	چندوجهی		۰/۷۵
۴۷۱۲/۴۹	احتمالی		
۵۲۵۴/۸۸	جعبه‌ای	۰/۸	
۵۳۳۱/۵۰	چندوجهی		
۴۶۴۹/۱۷	احتمالی		
۴۹۷۰/۴۵	جعبه‌ای	۰/۶	
۵۰۲۶/۳۲	چندوجهی		۱
۴۵۹۳/۹۱	احتمالی		
۴۸۵۴/۲۴	جعبه‌ای	۰/۸	
۴۹۲۲/۰۲	چندوجهی		



شکل ۱. تحلیل ارزش استوارسازی مدل پیشنهادی برحسب $e+15$ برای مدل‌های جعبه‌ای (BR) و چندوجهی (PR) و مقادیر τ^+ برای ۰/۰۴، ۰/۰۳، ۰/۰۲، ۰/۰۱

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به اهمیت لحاظ کردن عدم قطعیت فضای تصمیم‌گیری در مدیریت شبکه امداد تحت وقوع بحران، در این پژوهش یک مدل استوار توزیعی دومرحله‌ای ریسک‌گریزی برای پیکربندی شبکه امداد با در نظر گرفتن تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات، مقاوم‌سازی شبکه، مدیریت موجودی و برنامه‌ریزی توزیع اقلام امدادی ارائه شده است. بدین منظور عدم قطعیت پارامترهای کلیدی تقاضا، ظرفیت تسهیلات و مسیرهای ارتباطی مابین گره‌های شبکه امداد پس از وقوع اختلال با توجه به وضعیت عدم دسترسی به اطلاعات کافی پیرامون تابع توزیع پارامترهای یادشده در نظر گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی حل مدل توسعه‌یافته تحت اطلاعات ناکافی توابع توزیع احتمال پارامترهای غیرقطعی، مدل قرین قابل حل مدل استوار توزیعی تحت مجموعه‌های مبهم جعبه‌ای و چندوجهی ارائه شده است. نتایج ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی با بررسی مسائل عددی متعدد حاکی از کارایی آن در سطح مطلوب با ارزش استوارسازی و ریسک‌گریزی مناسب است؛ از این رو جواب‌های حاصل از حل مدل پیشنهادی تحت تأثیر عدم قطعیت ناشی از وقوع اختلال‌ها کارا خواهند بود. توصیه‌های مدیریتی زیر مبتنی بر یافته‌های کلیدی پژوهش ارائه شده است:

– مقادیر بالاتر از سطوح اطمینان به رفتار محافظه‌کارانه‌تری منجر می‌شود که افزایش سطح موجودی چرخه در شبکه امداد را در پی خواهد داشت. این در حالی است که تحت مجموعه ابهام جعبه‌ای، مقادیر موجودی تخصیص‌یافته برای تمامی اقلام افزایش خواهد یافت؛ درحالی‌که برای مجموعه چندوجهی این افزایش برای میزان اقلام محدودتری مشاهده می‌شود.

– با افزایش سطح عدم‌قطعیت در فضای تصمیم‌گیری، شبکه امداد تمایل دارد تا با نگهداری سطح بالاتری از موجودی در دسترس و مقاوم‌سازی تسهیلات بیشتری، به تقاضای مشتریان در حدود کیفیت مدنظر پاسخ دهد. این در حالی است که تمامی راهبردهای یادشده به افزایش هزینه‌های مدیریت شبکه منجر خواهد شد که خود کاهنده کارایی عملکرد مدیریت شبکه است؛ از این رو با تلاش در راستای کاهش عدم‌قطعیت فضای برنامه‌ریزی با کسب شناخت کافی در رفتار پارامترهای نامعین تحت تأثیر بروز اختلال، می‌توان با کاستن از رشد هزینه‌های مدیریت شبکه همچنان در سطح مطلوب اقدام به پاسخگویی به تقاضا برای دریافت خدمات کرد.

– در فضای طراحی شبکه امداد عدم‌قطعیت‌های بسیاری تحت تأثیر وقوع اختلال وجود دارد که به ریسک‌های متعددی در طراحی شبکه منجر می‌شود و نادیده‌گرفتن آن‌ها به کاهش کارایی شبکه منجر خواهد شد. این در حالی است که تصمیم‌گیرندگان به اطلاعات دقیق توابع توزیع احتمال پارامترهای نامعین دسترسی ندارند و تنها اطلاعات جزئی پیرامون آن در دسترس خواهد بود؛ از این رو توسعه مدل استوار توزیعی ریسک‌گریز می‌تواند عملکرد مناسب برای مواجهه با سطح بالایی از عدم‌قطعیت داشته باشد. نادیده‌گرفتن تفاوت در اطلاعات توابع توزیع به افزایش ریسک و درنهایت هزینه‌های تصمیم‌سازی منجر می‌شود. این در حالی است که مدل استوار توزیعی پیشنهادی با درنظرگرفتن ارزش انتظاری هزینه‌ها و ارزش در معرض ریسک شرطی می‌تواند با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت حاضر در برنامه‌ریزی عملکرد مطلوبی داشته باشد.

– نادیده‌گرفتن اثر دسترسی به اطلاعات ناکافی پیرامون توابع توزیع پارامترهای برنامه‌ریزی به دستیابی به نتایج حاصل از مدل احتمالی باکیفیت معنادار کمتر از مدل برنامه‌ریزی استوار توزیعی منجر می‌شود. علاوه بر آن، جواب بهینه حاصل از حل مدل استوار تحت تأثیر نوع مجموعه مبهم قرار خواهد گرفت. با افزایش ابعاد مجموعه مبهم، کیفیت جواب نیز کاهش خواهد یافت. علاوه بر آن، مجموعه شاخص‌های سطح اطمینان، ریسک‌گریزی و تنظیم‌کننده دارای اثر معنادار بر کیفیت جواب است؛ در نتیجه برای طراحی شبکه امداد کارا تحت بحران نیاز است تا سطوح مناسبی از پارامترهای یادشده مبتنی بر ترجیحات تصمیم‌گیرنده و شرایط واقعی فضای تصمیم‌گیری مدنظر قرار گیرد.

– در صورتی که مدیریت شبکه امداد در نظر داشته باشد تا در سطح اطمینان بالاتری اقدام به ارائه خدمت در شرایط بحرانی نماید، یک ساختار محافظه‌کارانه در شبکه ایجاد خواهد شد. این وضعیت، افزایش در سطح موجودی چرخه (متوسط موجودی) را به همراه دارد که با توجه به

ماهیت فاسد شونده بسیاری از اقلام امدادی و دوره عمر نگهداری محدود آن‌ها، این شرایط می‌تواند به افزایش اتلاف در موجودی در دسترس به دلیل سپری شدن دوره عمر منجر شود و در نهایت هزینه‌های مدیریت شبکه را افزایش خواهد داد؛ از این رو همکاری با منابع تأمین در بستر مدیریت قراردادها می‌تواند تا حد بسیاری چالش مدیریت موجودی اقلام فسادپذیر را در پی افزایش در سطح موجودی با امکان بازگرداندن اقلام نزدیک با دوره عمر کوتاه، اما مشخص باقی‌مانده، برطرف کند.

نتایج کسب‌شده در حالی است که در پژوهش حاضر، همبستگی مابین اختلال‌ها نادیده گرفته شده است. با توجه به همبستگی ممکن بین وقوع اختلال‌ها در سطوح مختلف شبکه امداد، بررسی مسئله یادشده برای انجام مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر بخش عمده‌ای از محصولات امدادی دارای ماهیت فسادپذیر و دوره عمر محدود نگهداری هستند. اگرچه می‌توان با تعامل و همکاری با تأمین‌کنندگان، محصولات نزدیک شده به پایان دوره عمر را به منابع تأمین برگشت داد. در نظر گرفتن رویکرد مدیریت قراردادها در همکاری با تأمین‌کنندگان برای چگونگی برگشت محصولات غیرقابل استفاده به دلیل دوره عمر اندک باقی‌مانده نیز می‌تواند در مطالعات آتی در نظر گرفته شود.

منابع

1. Ahmadi, M., Seifi, A. & Tootooni, B. (2015). A Humanitarian Logistics Model for Disaster Relief Operation Considering Network Failure and Standard Relief Time: A Case Study On San Francisco District. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.*, 75, 145–163.
2. Akgun, İ., Gumuşbuğa, F. & Tansel, B. (2015). Risk Based Facility Location By Using Fault Tree Analysis in Disaster Management. *Omega*, 52, 168-179.
3. Akkihal, A. R. (2004). Inventory Pre-positioning for Humanitarian Operations M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
4. Altay, N., & Green, W. G. (2006). Or/Ms Research in Disaster Operations Management. *European Journal of Operational Research*, 175, 475–493.
5. Anaya-Arenas, A. M., Renaud, J. & Ruiz, A. (2014). Relief Distribution Networks: A Systematic Review. *Annals of Operations Research*, 223, 1–27.
6. Aydin, N. (2016). A Stochastic Mathematical Model to Locate Field Hospitals under Disruption Uncertainty for Large-Scale Disaster Preparedness. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, 6, 85-102.
7. Barzinpour, F. & Esmaeili, V. (2014). A Multi-Objective Relief Chain Location Distribution Model for Urban Disaster Management. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 1291–1302.
8. Berman, O., Krass, D. & Menezes, M. B. C. (2007). Facility Reliability Issues In Network P-Median Problems: Strategic Centralization and Co-Location Effects. *Operations Research*, 55, 332–50.
9. Bertsimas, D. & Sim, M. (2004). The Price of Robustness. *Operations Research*, 52(1), 35-53.
10. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., Alinaghian, M. & Heydari, M. (2012). A Modified Particle Swarm Optimization for Disaster Relief Logistics under Uncertain Environment. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 60, 357–371.
11. Caunhye, A. M., Nie, X. & Pokharel, S. (2012). Optimization Models in Emergency Logistics: A Literature Review. *Soc.-Econ. Plan. Sci.*, 46, 4–13.
12. Doerner, K. F., Gutjahr, W. J. & Nolz, P. C. (2009). Multi-Criteria Location Planning For Public Facilities in Tsunami-Prone Coastal Areas. *Or Spectrum*, 31, 651-678.
13. Döyen, A., Aras, N. & Barbarosoglu, G. (2012). A Two-Echelon Stochastic Facility Location Model for Humanitarian Relief Logistics. *Optimiz. Lett.*, 6, 1123–1145.
14. Galindo, G. & Batta, R. (2013). Review of Recent Developments in Or/Ms Research in Disaster Operations Management. *European Journal of Operational Research*, 230, 201–211.
15. Garrido, R. A., Lamas, P. & Pino, F. J. (2014). A Stochastic Programming Approach for Floods Emergency Logistics. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.*, 75, 18–31.
16. Hasani, A. (2015). Marketing Strategies Selection for Supply Chain Management under Uncertainty Propagation. *Journal of Industrial Management Perspective*, 5(2), 33-62 (In Persian).
17. Hasani, A., Hosseini, S. (2015). A Comprehensive Robust Bi-objective Model and a Memetic Solution Algorithm for Designing Reverse Supply Chain

- Network under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 4(4), 31-54. (In Persian)
18. Hasani, A., Mokhtari, H. (2018). Redesign strategies of a comprehensive robust relief network for disaster management. *Socio-Economic Planning Sciences*, 64, 92-102.
 19. Hasani, A., & Mokhtari, H. (2019). An integrated relief network design model under uncertainty: A case of Iran. *Safety Science*, 111, 22-36.
 20. Hasanpour, J., Hasani, A., & Ghodoosi, M. (2018). Delayed Payment Policy in the Inventory Model of Deteriorating Goods with Quadratic Demand in Order to Backlogging Shortage. *Journal of Industrial Management Perspective*, 7(4), 199-230. (In Persian)
 21. Ikeda, Y. & Inoue, M. (2016). An Evacuation Route Planning for Safety Route Guidance System after Natural Disaster Using Multi-objective Genetic Algorithm. *Computer Science*, 96, 1323-1331.
 22. Jia, H., Ordóñez, F. & Dessouky, M. M. (2007a). A Modeling Framework for Facility Location of Medical Services for Large-Scale Emergencies. *IIE transactions*, 39, 41-55.
 23. Jia, H., Ordóñez, F. & Dessouky, M. M. (2007b). Solution Approaches for Facility Location of Medical Supplies for Large-Scale Emergencies. *Computers & Industrial Engineering*, 52, 257-276.
 24. Kılçı, F., Kara, B. Y. & Bozkaya, B. (2015). Locating Temporary Shelter Areas after an Earthquake: A Case for Turkey. *European Journal of Operational Research*, 243, 323-332.
 25. Lu, C. C. & Sheu, J. B. (2013). Robust Vertex P-Center Model for Locating Urgent Relief Distribution Centers. *Computers & Operations Research*, 40, 2128-2137.
 26. Ma, L., Liu, Y., & Liu, Y. (2020). Distributionally Robust Design for Bicycle-Sharing Closed-Loop Supply Chain Network under Risk-Averse Criterion. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118967.
 27. Mete, H. O. & Zabinsky, Z. B. (2010). Stochastic Optimization of Medical Supply Location and Distribution in Disaster Management. *International Journal of Production Economics*, 126, 76-84.
 28. Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J., & Zenios, S.A. (1995). Robust Optimization of Large-Scale Systems. *Operations Research*, 43, 2, 264-281.
 29. Noyan, N. (2012). Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management. *Computers & Operations Research*, 39(3), 541-559.
 30. Onan, K., Ülengin, F. & Sennaroğlu, B. (2015). An Evolutionary Multi-Objective Optimization Approach to Disaster Waste Management: A Case Study of Istanbul, Turkey. *In Expert Systems with Applications*, 42, 8850-8857.
 31. Özdamar, L. & Ertem, M. A. (2015). Models, Solutions and Enabling Technologies in Humanitarian Logistics. *Eur. J. Oper. Res.*, 244, 55-65.
 32. Rawls, C. G. & Turnquist, M. A. 2010. Pre-Positioning of Emergency Supplies for Disaster Response. *Transp. Res. Part B: Methodol*, 44, 521-534.
 33. Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. (2000). Optimization of conditional value at risk. *Journal of Risk*, 3(3), 21-41.

34. Sabouhi, F., Heydari, M. & Bozorgi-Amiri, A. (2016). Multi-Objective Routing and Scheduling For Relief Distribution with Split Delivery in Post-Disaster Response. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 9, 17-27.
35. Snyder, L. V. & Daskin, M. S. (2005). Reliability Models for Facility Location: The Expected Failure Cost Case. *Transportation Science*, 39, 400-16.
36. Tofighi, S. (2011). A Logistics Planning Model and Solution Method in Humanitarian Relief Chains. *M.Sc Thesis, University of Tehran*.